

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-334836

(43)Date of publication of application : 22.11.2002

(51)Int.Cl.

H01L 21/027
G03F 7/20

(21)Application number : 2002-097334 (71)Applicant : ASML NETHERLANDS BV

(22)Date of filing : 22.02.2002 (72)Inventor : SOCHA ROBERT JOHN

(30)Priority

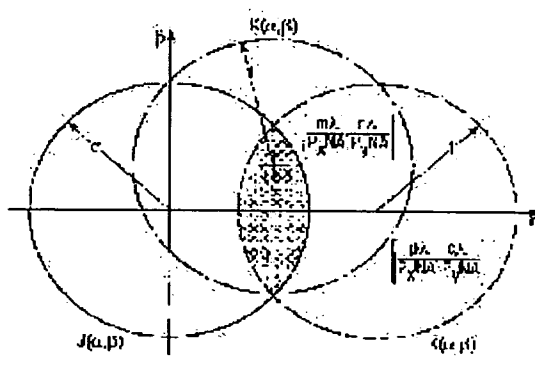
Priority number : 2001 271305 Priority date : 23.02.2001 Priority country : US

(54) OPTIMIZATION OF ILLUMINATION FOR SPECIFIC MASK PATTERN

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method and device for optimizing an illumination profile for a pattern of selected patterning means.

SOLUTION: The method and device for microlithography includes optimizing illumination modes, based on the features of a specific mask pattern. The illumination is optimized by determining an appropriate illumination mode, based on the diffraction order of a reticle and the autocorrelation of a projection optics. By eliminating the part of the illumination pattern which has no influence on modulation, excess DC light can be reduced, thereby improving the depth of focus. Optimization of the mask pattern includes addition of sub-resolution features, to reduce pitches and truncate the probability density function of a space width.



【外国語明細書】

1 Title of Invention

ILLUMINATION OPTIMIZATION FOR SPECIFIC MASK PATTERNS

2 Claims

1. A method of optimizing an illumination profile for a selected patterning means pattern, comprising the steps of:
defining a transmission cross coefficient function for an optical system including an illuminator and the selected patterning means pattern;
determining relative relevance to imaging of diffraction orders based on the selected pattern; and
calculating an optimized illumination configuration from the transmission cross coefficient function, weighting regions of the illumination configuration based on the relative relevance to imaging of the diffraction orders.
2. A method as in claim 1, wherein the step of determining relative relevance to imaging of diffraction orders further comprises the step of:
determining a characteristic pitch of the selected mask pattern.
3. A method as in claim 2, further comprising the steps of:
identifying a critical region of the selected pattern prior to determining the characteristic pitch,
wherein determining the characteristic pitch for the selected pattern is performed by determining the characteristic pitch for the critical region.
4. A method as in claim 3, wherein the step of identifying a critical region further comprises identifying a plurality of critical regions and wherein determining the characteristic pitch for the critical region includes:
comparing a pitch of each identified critical region; and
if the pitch of each identified region is substantially equal, determining the characteristic pitch for the critical region to be equal to the characteristic pitch of one of the identified regions.

5. A method as in any one of the preceding claims, further comprising weighting regions of the illuminator configuration based on a selected optimized metric selected from the group consisting of depth of focus, end-of-line, image log slope (ILS), image slope (IS), and aberration sensitivity.

6. A method as in claim 1 or 2, further comprising the steps of:
identifying a plurality of critical regions;
determining a pitch of each of the identified critical regions; and
calculating optimized illumination configurations from the transmission cross coefficient function, weighing orders based on relevance to imaging of diffraction orders for each critical region, and
wherein calculating an optimized illumination configuration further comprises calculating a composite optimized illumination configuration based on the calculated optimized illumination configuration for each critical region.

7. A method as in any one of the preceding claims, further comprising the steps of:
modifying the selected pattern by optical proximity correction techniques to reduce a total number of different pitches in the mask pattern.

8. A method as in claim 7, wherein the step of modifying the selected pattern by optical proximity correction techniques further comprises addition of sub-resolution features to the selected mask pattern.

9. A method as in claim 7, wherein the steps of modifying the selected pattern and calculating an optimized illumination configuration steps are iterated.

10. A computer program for optimizing an illumination profile comprising program code means that, when executed on a computer system, instruct the computer system to carry out the steps of the method of any one of claims 1 to 9.

11. A device manufacturing method comprising the steps of:
(a) providing a substrate that is at least partially covered by a layer of radiation-sensitive material;
(b) providing a projection beam of radiation using an illumination system;
(c) using patterning means to endow the projection beam with a pattern in its cross-section;

(d) projecting the patterned beam of radiation onto a target portion of the layer of radiation-sensitive material, wherein, prior to step (d), the cross-sectional intensity distribution in the projection beam produced in step (b) is tailored to the pattern employed in step (c) using a method according to any one of claims 1 to 9.

12. A lithographic projection apparatus comprising:

- an illumination system for providing a projection beam of radiation;
- a support structure for supporting patterning means, the patterning means serving to pattern the projection beam according to a desired pattern;
- a substrate table for holding a substrate;
- a projection system for projecting the patterned beam onto a target portion of the substrate,

wherein the apparatus additionally comprises:

- calculating means, for defining a transmission cross coefficient function for the illuminator and the patterning means, determining relative relevance to imaging of diffraction orders based on the pattern produced by the patterning means, and calculating an optimized illumination configuration from the transmission cross coefficient function, weighing regions of the illumination configuration based on the relative relevance to imaging of the diffraction orders; and
- selecting means, for selecting the cross-sectional intensity distribution in the projection beam exiting the illumination system in accordance with the illumination configuration calculated by the said calculating means.

13. A method of optimizing a selected mask design comprising:

- identifying critical features of the selected mask design;
- determining an optimized illumination profile based on diffraction orders of the critical features; and
- modifying the selected mask design by use of optical proximity correction techniques which are selected to reduce a number of pitches present in the selected mask design.

14. A method as in claim 11 wherein the optical proximity correction further comprises addition of sub-resolution features selected to modify a continuous probability density function of the space width of the selected mask design such that the modified probability density function has an increased discretization.

15. A method as in claim 13 or 14 wherein said step of determining an optimized illumination profile comprises the steps of the method of any one of claims 1 to 9.

16. A computer program for optimizing a selected mask design comprising program code means that, when executed on a computer, instruct the computer to carry out the method of any one of claims 13 to 15.

3 Detailed Description of Invention

This invention relates generally to a method and apparatus for microlithographic imaging. More particularly, it relates to an apparatus and method for optimizing an illumination configuration according to the specific pattern being imaged.

Optical lithography systems are in current use in the manufacture of integrated circuits and other fine featured products such as programmable gate arrays. In a most general description, a lithography apparatus includes an illumination system which provides a projection beam of radiation, a support structure which holds a patterning means, a substrate table which holds a substrate, and a projection system (lens) for imaging the patterned beam onto a target portion of the substrate.

The term patterning means should be broadly interpreted as referring to devices and structures that can be used to endow an incoming radiation beam with a patterned cross-section, corresponding to a pattern that is to be created in a target portion of a substrate; the term "light valve" has also been used in this context. Generally, the pattern will correspond to a particular functional layer in a device being created in the target portion, such as an integrated circuit or other device.

One example of such a device is a mask, which is generally held by a (movable) mask table. The concept of a mask is well known in lithography, and it includes mask types such as binary, alternating phase-shift, and attenuated phase-shift, as well as various hybrid mask types. Placement of such a mask in the projection beam causes selective transmission (in the case of a transmissive mask) or reflection (in the case of a reflective mask) of the radiation impinging on the mask, according to the pattern on the

mask. The mask table ensures that the mask can be held at a desired position in the incoming projection beam, and that it can be moved relative to the beam if so desired.

Another example of such a device is a matrix-addressable surface having a viscoelastic control layer and a reflective surface. The basic principle behind such an apparatus is that (for example) addressed areas of the reflective surface reflect incident light as diffracted light, whereas unaddressed areas reflect incident light as undiffracted

light. Using an appropriate filter, the said undiffracted light can be filtered out of the reflected beam, leaving only the diffracted light behind; in this manner, the beam becomes patterned according to the addressing pattern of the matrix-addressable surface. An alternative embodiment of a programmable mirror array employs a matrix arrangement of tiny mirrors, each of which can be individually tilted about an axis by applying a suitable localized electric field, or by employing piezoelectric actuation means. Once again, the mirrors are matrix-addressable, such that addressed mirrors will reflect an incoming radiation beam in a different direction to unaddressed mirrors; in this manner, the reflected beam is patterned according to the addressing pattern of the matrix-addressable mirrors. The required matrix addressing can be performed using suitable electronic means. In both of the situations described hereabove, the patterning means can comprise one or more programmable mirror arrays. More information on mirror arrays as here referred to can be gleaned, for example, from United States Patents US 5,296,891 and US 5,523,193, and PCT patent applications WO 98/38597 and WO 98/33096, which are incorporated herein by reference. In the case of a programmable mirror array, the said support structure may be embodied as a frame or table, for example, which may be fixed or movable as required.

Another example is a programmable LCD array, in which case the support structure can again be a frame or table, for example. An example of such a construction is given in United States Patent US 5,229,872, which is incorporated herein by reference.

For purposes of simplicity, the rest of this text may, at certain locations, specifically direct itself to examples involving a mask; however, the general principles discussed in such instances should be seen in the broader context of the patterning means as hereabove set forth.

The term projection system encompasses various types of projection systems. Though "lens" in a layperson's understanding usually connotes only refractive optics, herein this term is used broadly to include catoptric and catadioptric systems, for example. The illumination system may also include elements operating according to any of these principles for directing, shaping or controlling the projection beam, and such elements may also be referred to below, collectively or singularly, as a "lens".

Additionally, the term "wafer table" may be used without implying that the substrate receiving the image is a silicon wafer, but may rather indicate a stage suited for support of any substrate to be processed by the lithography apparatus.

Lithographic projection apparatus can be used, for example, in the manufacture of integrated circuits (ICs). In such a case, the patterning means may generate a circuit pattern corresponding to an individual layer of the IC, and this pattern can be imaged onto a target portion (comprising one or more dies) on a substrate (silicon wafer) that has been coated with a layer of radiation-sensitive material (resist). In general, a single wafer will contain a network of adjacent target portions that are successively irradiated via the projection system, one at a time. In current apparatus, employing patterning by a mask on a mask table, a distinction can be made between two different types of machine. In one type of lithographic projection apparatus, each target portion is irradiated by exposing the entire mask pattern onto the target portion at once; such an apparatus is commonly referred to as a wafer stepper. In an alternative apparatus — commonly referred to as a step-and-scan apparatus — each target portion is irradiated by progressively scanning the mask pattern under the projection beam in a given reference direction (the "scanning" direction) while synchronously scanning the substrate table parallel or anti-parallel to this direction. Since, in general, the projection system will have a magnification factor M (generally < 1), the speed V at which the substrate table is scanned will be a factor M times that at which the mask table is scanned. More information with regard to lithographic devices as here described can be gleaned, for example, from US 6,046,792, incorporated herein by reference.

In a manufacturing process using a lithographic projection apparatus, a pattern (e.g. in a mask) is imaged onto a substrate that is at least partially covered by a layer of radiation-sensitive material (resist). Prior to this imaging step, the substrate may undergo various procedures, such as priming, resist coating and a soft bake. After exposure, the substrate may be subjected to other procedures, such as a post-exposure bake (PEB), development, a hard bake and measurement/inspection of the imaged

features. This array of procedures is used as a basis to pattern an individual layer of a device, e.g. an IC. Such a patterned layer may then undergo various processes such as etching, ion-implantation (doping), metallization, oxidation, chemo-mechanical polishing, etc., all intended to finish off an individual layer. If several layers are required, then the whole procedure, or a variant thereof, will have to be repeated for each new layer. Eventually, an array of devices will be present on the substrate (wafer). These devices are then separated from one another by a technique such as dicing or sawing, whence the individual devices can be mounted on a carrier, connected to pins, etc. Further information regarding such processes can be obtained, for example, from the book "Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing", Third Edition, by Peter van Zant, McGraw Hill Publishing Co., 1997, ISBN 0-07-067250-4, incorporated herein by reference.

For the sake of simplicity, the projection system may hereinafter be referred to as the "lens"; however, this term should be broadly interpreted as encompassing various types of projection system, including refractive optics, reflective optics, and catadioptric systems, for example. The radiation system may also include components operating according to any of these design types for directing, shaping or controlling the projection beam of radiation, and such components may also be referred to below, collectively or singularly, as a "lens". Further, the lithographic apparatus may be of a type having two or more substrate tables (and/or two or more mask tables). In such "multiple stage" devices the additional tables may be used in parallel, or preparatory steps may be carried out on one or more tables while one or more other tables are being used for exposures. Dual stage lithographic apparatus are described, for example, in US 5,969,441 and WO 98/40791, incorporated herein by reference.

As illumination systems have evolved from producing conventional to annular, and on to quadrupole and more complicated illumination configurations, the control parameters have concurrently become more numerous. In a conventional illumination pattern, a circular area including the optical axis is illuminated, the only adjustment to the pattern being to alter the outer radius (σ_o). Annular illumination requires the definition of an inner radius (σ_i) in order to define the illuminated ring. For multipole

patterns, the number of parameters which can be controlled continues to increase. For example in a quadrupole illumination configuration, in addition to the two radii, a pole angle α defines the angle subtended by each pole between the selected inner and outer radii.

Concurrently, mask technology has been evolving as well. Binary intensity masks have given way to phase-shifted masks and other advanced designs. While a binary mask simply transmits, reflects or blocks imaging radiation at a given point, a phase-shifted mask may attenuate some radiation or it may transmit or reflect the light after imparting a phase shift, or both. Phase-shifted masks have been used in order to image features which are on the order of the imaging radiation's wavelength or smaller, since diffraction effects at these resolutions can cause poor contrast and end-of-line errors, among other problems.

The various types of illumination configurations can be used to provide improvements in resolution, depth of focus, contrast and other characteristics of the printed image. However, each illumination type has certain tradeoffs. For example, improved contrast may come at the expense of depth of focus; each type of mask has a performance which is dependent on the pattern to be imaged as well.

Conventionally, in order to select the optimum illumination mode for a given pattern to be imaged onto a wafer, a series of test wafers has been exposed and compared on a hit-or-miss basis. As noted above, modern illumination systems have ever increasing numbers of variables which can be manipulated. As the various permutations of variable settings increase, the cost of trial and error optimization of illumination configurations becomes very large and quantitative methods of selecting illumination configurations are needed.

To provide for the above identified needs and others, the present invention provides a method of optimizing an illumination profile for a selected patterning means pattern, comprising the steps of:

defining a transmission cross coefficient function for an optical system including an illuminator and the selected patterning means pattern;

determining relative relevance to imaging of diffraction orders based on the selected pattern; and

calculating an optimized illumination configuration from the transmission cross coefficient function, weighting regions of the illumination configuration based on the relative relevance to imaging of the diffraction orders.

According to another aspect of the present invention there is provided a device manufacturing method comprising the steps of:

- (a) providing a substrate that is at least partially covered by a layer of radiation-sensitive material;
- (b) providing a projection beam of radiation using an illumination system;
- (c) using patterning means to endow the projection beam with a pattern in its cross-section;
- (d) projecting the patterned beam of radiation onto a target portion of the layer of radiation-sensitive material, wherein, prior to step (d), the cross-sectional intensity distribution in the projection beam produced in step (b) is tailored to the pattern employed in step (c) using a method as described above.

According to another aspect of the present invention there is provided a lithographic projection apparatus comprising:

- an illumination system for providing a projection beam of radiation;
- a support structure for supporting patterning means, the patterning means serving to pattern the projection beam according to a desired pattern;
- a substrate table for holding a substrate;
- a projection system for projecting the patterned beam onto a target portion of the substrate,

wherein the apparatus additionally comprises:

- calculating means, for defining a transmission cross coefficient function for the illuminator and the desired pattern, determining relative relevance to imaging of diffraction orders based on the pattern produced by the patterning means, and calculating an optimized illumination configuration from the transmission cross

coefficient function, weighing regions of the illumination configuration based on the relative relevance to imaging of the diffraction orders; and

- selecting means, for selecting the cross-sectional intensity distribution in the projection beam exiting the illumination system in accordance with the illumination configuration calculated by the calculating means.

According to a yet another aspect of the present invention there is provided a method of optimizing a selected mask design comprising:

- identifying critical features of the selected mask design;

- determining an optimized illumination profile based on diffraction orders of the critical features; and

- modifying the selected mask design by use of optical proximity correction techniques which are selected to reduce a number of pitches present in the selected mask design.

The present invention further provides computer programs for carrying out the methods described above.

Although specific reference may be made in this text to the use of the apparatus according to the invention in the manufacture of ICs, it should be explicitly understood that such an apparatus has many other possible applications. For example, it may be employed in the manufacture of integrated optical systems, guidance and detection patterns for magnetic domain memories, liquid-crystal display panels, thin-film magnetic heads, etc. The skilled artisan will appreciate that, in the context of such alternative applications, any use of the terms "reticle", "wafer" or "die" in this text should be considered as being replaced by the more general terms "mask", "substrate" and "target portion", respectively.

The present invention will be described further below with reference to exemplary embodiments and the accompanying drawings, in which:

The present invention involves first mathematically modeling the imaging of the pattern onto the substrate (e.g. from a mask), taking into account the illumination source and the pattern details.

There are two primary methods for calculating the aerial image for a finite illumination source. These methods are Abbe's formulation and Hopkins's formulation. In Abbe's formulation, each point source in the illumination configuration produces a plane wave incident onto the pattern, and each of these point sources is imaged onto the wafer. Since the source is spatially incoherent, the total intensity at the wafer is the summation of the intensity produced by each of these point sources. Therefore, in Abbe's formulation, the integration over the illumination configuration is performed after the integration over the pattern.

In Hopkins's formulation, the order of integration is switched, i.e., the integration over the source is performed first. In Hopkins's formulation, a four dimensional transmission cross coefficient (TCC) is defined, and the image intensity is the inverse Fourier transform of the TCC. A derivation of the TCC is described, for example, in Born and Wolf, Principles of Optics, 6th Ed., pp. 528-532, herein incorporated by reference.

The TCC is the autocorrelation of the projection pupil multiplied by the illumination pupil. The TCC is shown in Figure 1 as a set of three overlapping circles. From left to right, the first circle represents the illumination pupil $J_i(\alpha, \beta)$ where α and β are coordinates of the illumination configuration. For the purposes of the following calculations, the radius of J_i may be, for example, set to the maximum allowable outer σ , for the lithography apparatus which will be used for imaging. It is also possible to set σ , to 1.0 or larger in order to perform feasibility studies and to determine the benefits of a larger σ .

The central circle represents the projection pupil, $K(\alpha, \beta)$ that is centered at $(-m\lambda/P_x NA, -n\lambda/P_y NA)$. The coordinate systems are normalized by a factor of λ/NA so that the radius of K is 1.0. The circle on the right likewise represents the projection pupil; however, it is centered at $(p\lambda/P_x NA, q\lambda/P_y NA)$. In these last two expressions, m, n, p , and q correspond to discrete diffraction orders and it becomes clear that the TCC is a four dimensional (4-D) equation as described above. The diffraction orders in the x-direction are represented by m and p and the diffraction orders in the y-direction are represented by n and q . Though for purposes of this description, x and y coordinates are

used, one skilled in the art understands that alternate coordinate systems could be used with appropriate changes of coordinate systems in the following equations.

The TCC for a 4-D discrete point (m,n,p,q) is the integral of the shaded area where all three circles overlap. Since the structure is assumed to be periodic, the Fourier transform of the pattern is discrete and the TCC is discrete. For a continuous pattern image, the pitch can be increased until an adjacent feature has no influence on the Fourier transform of the pattern of interest. The TCC in Figure 1 is described mathematically in Equation 1.

$$TCC(m,n,p,q) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K\left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA}\right) K^*\left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA}\right) d\alpha d\beta \quad \text{Eqn. 1}$$

The TCC may be expanded to include the effects of the pattern by defining diffraction order cross coefficients (DOCC). The DOCC are defined in Equation 2 which is derived from the multiplication of the TCC by the Fourier transform coefficients of the pattern.

$$DOCC(m, n, p, q) = T(m, n) T^*(-p, -q) TCC(m, n, p, q) \quad \text{Eqn. 2}$$

Further, the radiation intensity at the wafer may be calculated by the inverse Fourier transform of the DOCC, as shown in Eqn. 3.

$$I(x, y) = \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{ix\left[\frac{2\pi}{P_x}(m+p)\right]} e^{iy\left[\frac{2\pi}{P_y}(n+q)\right]} DOCC(m, n, p, q) \quad \text{Eqn. 3}$$

The projection optical system acts in part as a low pass filter, which reduces the diffraction orders so that only a few of the diffraction orders are important to the calculated image intensity. As a result, the TCC is a band limited function. The maximum necessary x and y orders can be calculated according to Equations 4 and 5

respectively. In each case, both the negative and positive orders are necessary, for example m extends from negative m_{\max} to positive m_{\max} ($-m_{\max} \leq m \leq +m_{\max}$). Since both negative and positive orders are needed, the size of the TCC is $2m_{\max}+1$ by $2n_{\max}+1$ by $2p_{\max}+1$ by $2q_{\max}+1$. Fortunately, however, because the TCC is band limited, it is not necessary to calculate all the pattern diffraction orders. Like in the TCC, only pattern diffraction orders $-m_{\max} \leq m \leq +m_{\max}$ in the x direction and orders $-n_{\max} \leq n \leq +n_{\max}$ in the y direction are needed.

$$f_{x\max} = m_{\max} = p_{\max} = \text{floor} \left[\frac{P_x NA (1 + \sigma_o)}{\lambda} \right] \quad \text{Eqn. 4}$$

$$f_{y\max} = n_{\max} = q_{\max} = \text{floor} \left[\frac{P_y NA (1 + \sigma_o)}{\lambda} \right] \quad \text{Eqn. 5}$$

Substituting Equations 1 and 2 into Equation 3 gives Equation 6 for the radiation intensity at the wafer. By switching the order of integration, as shown in Equation 7, that is, by using Abbe's formulation rather than Hopkins's, the portions of the illumination pupil which are most influential on imaging may be determined. Note that each of Equations 6 and 7 extends across two lines.

$$I(x, y) = \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{ix \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{iy \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} T(m, n) T^*(-p, -q) \quad \text{Eqn. 6}$$

$$\bullet \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) d\alpha d\beta$$

$$I(x, y) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} d\alpha d\beta \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{i\left[\frac{2\pi}{P_x}(m+p)\right]} e^{i\left[\frac{2\pi}{P_y}(n+q)\right]} \quad \text{Eqn. 7}$$

$$\cdot J_s(\alpha, \beta) T(m, n) T^*(-p, -q) K\left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA}\right) K^*\left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA}\right)$$

Since α and β represent illumination pupil coordinates, a new function, J_{opt} , may be defined. The new function J_{opt} indicates which part of the illumination configuration (α, β) is being used for a given diffraction order (m, n, p, q) and is expressed in Equation 8. From Equation 8, the image intensity can be calculated by multiplying it by the inverse Fourier coefficient ($e^{i\alpha}$) and summing over all 6 variables $(m, n, p, q, \alpha, \beta)$ as shown in Equation 9.

$$J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = J_s(\alpha, \beta) T(m, n) T^*(-p, -q) K\left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA}\right) K^*\left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA}\right)$$

Eqn. 8

$$I(x, y) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} d\alpha d\beta \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{i\left[\frac{2\pi}{P_x}(m+p)\right]} e^{i\left[\frac{2\pi}{P_y}(n+q)\right]} J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \quad \text{Eqn. 9}$$

As will be appreciated, J_{opt} is a six dimensional function and it is therefore difficult to apply it to the illumination configuration. In order to best determine which portions of the illumination configuration are significant to image formation, it is desirable to eliminate a few of the six variables.

The aerial image intensity, $I(x, y)$, is found by taking an inverse transform over $m+p$ and $n+q$. When $m+p=n+q=0$, there is no modulation in the aerial image intensity.

Since one of the goals of illumination optimization is to eliminate parts of the illumination configuration that have little or no influence on modulation, those portions of the illumination configuration for which $m+p = n+q = 0$ may be eliminated. In order to eliminate these parts and to better visualize the illumination configuration portions significant to image formation, a transformation of variables will eliminate two of the variables in the six dimensional J_{opt} function (four diffraction orders) and convert it into a four dimensional function (two diffraction orders). The four dimensional function is called J_{opt-2D} . By substituting Equations 10 and 11 into Equation 9 for $I(x,y)$, Equation 12 may be derived.

$$\eta = m + p \Rightarrow p = \eta - m \quad \text{Eqn. 10}$$

$$\xi = n + q \Rightarrow q = \xi - n \quad \text{Eqn. 11}$$

$$I(x,y) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} d\alpha d\beta \sum_{\eta=-2f_{xmax}}^{+2f_{xmax}} \sum_{\xi=-2f_{ymax}}^{+2f_{ymax}} e^{ix \left[\frac{2\pi}{P_x} \eta \right]} e^{iy \left[\frac{2\pi}{P_y} \xi \right]} \underbrace{\sum_{m=-f_{xmax}}^{+f_{xmax}} \sum_{n=-f_{ymax}}^{+f_{ymax}} J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, \eta-m, \xi-n)}_{J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi)}$$

Eqn. 12

In Equation 12, J_{opt-2D} can be seen to be the summation of J_{opt} over m and n after the transformation of variables according to Equations 10 and 11. By further substituting Equation 8 into Equation 12, J_{opt-2D} may be expressed as in Equation 13 and the intensity, $I(x,y)$, can be written as a function of J_{opt-2D} as in Equation 14.

$$J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) = J_s(\alpha, \beta) \sum_{m=-f_{xmax}}^{+f_{xmax}} \sum_{n=-f_{ymax}}^{+f_{ymax}} T(m, n) T^*[-(\eta-m), -(\xi-n)] \quad \text{Eqn. 13}$$

$$\bullet K \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K^* \left(\alpha - (\eta-m) \frac{\lambda}{P_x NA}, \beta - (\xi-n) \frac{\lambda}{P_y NA} \right)$$

$$I(x, y) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < a} d\alpha d\beta \sum_{\eta=-2f_{x, \max}}^{+2f_{x, \max}} \sum_{\xi=-2f_{y, \max}}^{+2f_{y, \max}} e^{i\alpha \left[\frac{2\pi}{f_x} \eta \right]} e^{i\beta \left[\frac{2\pi}{f_y} \xi \right]} J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) \quad \text{Eqn. 14}$$

The function, J_{opt-2D} , when evaluated, shows those portions of the illumination configuration that are important for each diffraction order. Since J_{opt-2D} is weighted by each diffraction order, $T(m, n)$, large diffraction orders will have a greater influence on the aerial image.

A starting point for the best illumination configuration for a particular pattern may be denoted J_{tot} and is found by summing J_{opt-2D} over η and ξ and subtracting $J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta=0, \xi=0)$ as shown in Equation 15. In Equation 15, when $\eta=0$ and $\xi=0$ there is no modulation in the aerial image and the $J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta=0, \xi=0)$ component represents zero order or DC light. Points in the illumination that do not contribute to imaging increase the overall amount of DC light. Since the increased DC light causes no modulation it is not of great benefit, and moreover it can result in a reduction in depth of focus.

Thus, an illumination configuration in accordance with J_{tot} minimizes the amount of DC light and results in an improved process window. The equation J_{tot} can be used to show which parts of the illuminator are more significant (or less significant) to image formation.

$$J_{tot}(\alpha, \beta) = \left[\sum_{\eta=-2f_{x, \max}}^{+2f_{x, \max}} \sum_{\xi=-2f_{y, \max}}^{+2f_{y, \max}} J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) \right] - J_{opt-2D}(\alpha, \beta, 0, 0) \quad \text{Eqn. 15}$$

Since the illumination configuration and pattern are coupled, optical proximity correction (OPC) changes influence the diffraction orders, which therefore influences J_{tot} . Consequently, modifications to the starting illumination configuration, J_{tot} , and the pattern should be performed a few times using iterations of processing with an OPC engine and an illumination engine, as will be understood by one skilled in the art.

Furthermore, the pattern and illumination configuration also need to be adjusted to optimize a particular imaging criteria (depth of focus (DOF), end of line (EOL), aberration sensitivity, etc.) which may be performed with optimization software. However, since the pattern as a whole, rather than the OPC features, has the largest impact on the optimal illumination configuration, J_{tot} is the best initial illumination configuration to lead to the fastest convergence for optimizing iterations over the illumination configuration and pattern.

The starting illumination configuration, J_{tot} , may be represented by a gray scale illumination configuration having continuous values of intensity over a 0 to 1 range. It is possible to create such a gray scale illumination configuration with a diffractive optical element (DOE) or by using a quartz plate with dithered chromium plating. If a gray scale illumination configuration is not possible or preferred, the illuminator profile can be forced to be only 0 and 1 by applying a threshold to the gray scale, in which values above the threshold are rounded up to 1 and values below the threshold are rounded down to 0. An arbitrary threshold can be applied, or an optimal threshold may be found through simulating the process window, or by repeated test runs.

Example 1: The technique for calculating J_{tot} outlined above was applied to a brick wall isolation pattern. A 150nm pattern was shrunk to 130nm and 110nm design rules and imaged with a step and scan lithography system having a numerical aperture (NA) of 0.8. The isolation pattern for the 130nm design rule is shown in Figure 2.

The magnitudes of the diffraction orders of this mask feature are plotted in Figure 3. In Figure 3, the largest order is the (0,0) order or the DC background light. The orders that contribute the most to imaging are the $(\pm 2, 0)$ orders and represent the vertical bricks in the brick wall pattern. The other significant order is the $(\pm 1, \pm 1)$ which represents the clear areas and defines the end of the isolation pattern. The higher orders also help to define two dimensional structures such as the end of each line. Since the diffraction orders are not constant, the orders change the weighting coefficients in the DOCC, which implies that the mask pattern influences the illumination strategy.

The diffraction order coefficients $T(m,n)$ in Figure 3 can be substituted into Equation 13 to calculate J_{opt-2D} and are plotted in Figure 4. As can be seen from Figure

4, the largest contribution to $J_{\text{opt-2D}}$ is the $(\eta=0, \xi=0)$ order. The $(0,0)$ order does not contribute to imaging and decreases the DOF. As Equation 15 shows, this $(0,0)$ order can be subtracted from the total illumination, J_{tot} . Not considering the $(0,0)$ order, the largest contribution is the $(\eta=\pm 2, \xi=0)$ diffraction order, which represents the formation of the isolation lines along the x-direction. Another component that is large and defines the end of the isolation lines is the $(\eta=\pm 1, \xi=\pm 1)$ diffraction order. Although the $(0, \pm 2)$ diffraction order is rather small, higher orders combine in the $\eta=0$ and $\xi=\pm 2$ region of the lens. These regions also help to define the end of line. The DOCC approach shows how the illumination pupil is sampled for improved image formation and is an effective method for understanding imaging of the brick wall isolation pattern.

Using Equation 15, the illumination pupil of the brick wall pattern for the 130nm design rule can be calculated and is shown in Figure 5. Figure 5 shows that the most significant areas for image formation are the outer portions of the illumination configuration along the x-axis. These outer portions form an elliptical dipole. In addition to these elliptical dipole elements, the center of the illumination pupil has a large contribution to image formulation. As noted above, the illumination pupil can be implemented in gray scale or binary illumination profiles.

Depending on the apparatus being used, gray scale illumination may be possible. By gray scale illumination is meant controllable illumination intensity for which a normalized level ranging from 0 to 1 may be selected for at least given portions of the illumination configuration. For example, such control over illumination intensity may be produced by use of a diffractive optical element (DOE) in the illumination system. In this case, for example, the illumination configuration can be implemented as shown in Figure 5. However, some of the local spikes which are calculated in theory and seen in Figure 5 will be removed after low pass filtering of the illumination information as a result of the projection optics, as discussed above. Therefore, when designing an illumination configuration, spikes which will be filtered should be ignored.

If a binary illumination configuration is used, i.e., only binary values for intensity of the illuminator are allowed (0 or 1), a threshold value should be chosen as a basis for assigning values of 0 or 1 to each point on the illumination configuration. For

example, if a threshold of 0.8 is chosen, illuminator intensity values above 0.8 are rounded up to 1 and values below 0.8 are rounded down to 0. Other threshold values may be applied as desired.

Example 2: Using the gray scale to binary approach, a binary illumination configuration for the same brick wall isolation pattern was designed assuming a maximum outer σ of 0.88 and is shown in Figure 6.

The performance of the optimized illumination configuration in Figure 6 was then simulated for binary mask on a step and scan photolithography apparatus having $NA=0.8$ and $\lambda=248nm$ and compared to the simulated performance of annular illumination. In the simulation, the vector (thin-film) imaging resist model was used since the numerical aperture was above 0.7. In this model, the resist is 400nm thickness of a type having a refractive index $n=1.76-j0.0116$, over 66nm of another type having $n=1.45-j0.3$ on top of a polysilicon material having $n=1.577-j3.588$. The results with the annular illumination ($\sigma_{in}=0.58$ and of $\sigma_{out}=0.88$) and with the optimized illuminator ($\sigma_{out}=0.88$) are shown in Figures 7 and 8, respectively. In both Figures 7 and 8, cross section results in the middle of the isolation region and top down simulation results are shown. In the Figures, the Bossung plot B from aerial image threshold is calculated by averaging the intensity through the resist, and the resultant linewidth, lw , is plotted versus focus, f , for a threshold intensity. This technique tends to over predict the DOF as thickness loss and resist profile slope is not taken into consideration. A resist model that at least calculates thickness loss is probably necessary. In each of the figures, the top down results are plotted as solid, curved lines at the best threshold (best dose) as calculated by the Bossung plot. These simulated threshold images are compared to actual mask data shown in dashed, straight lines.

Simulation results for the 130nm design rule brick wall isolation pattern are plotted in Figure 7 for a binary mask feature with NA of 0.8 using annular illumination ($\sigma_{in}=0.58$ and of $\sigma_{out}=0.88$). This annular setting has approximately $0.4\mu m$ of DOF from $-0.4\mu m$ to $0.0\mu m$ focus. The contrast of the resist is low through focus, and can be imaged with a low contrast resist. However, at this low intensity contrast, the mask error enhancement factor (MEEF) is large and the exposure latitude (EL) is small. The

top down images in Figure 7 also show that there is approximately 20nm of end of line (EOL) shortening, which can be fixed by extending the line slightly for the 130nm design rule. However, as the design rule continues to shrink, extending the line is no longer feasible as the extended line may conflict with other features. Therefore, it is desirable to fix the EOL with the illumination.

In Figure 8, simulation results for the 130nm design rule brick wall isolation pattern are plotted for a binary mask feature with NA of 0.8 and using the optimized binary illumination configuration in FIG. 6. The optimal illumination configuration has approximately 0.6 μ m DOF from -0.45 μ m to +0.15 μ m focus. In comparing the cross section images in Figure 8 to those in Figure 7, the optimized illumination configuration has a larger contrast through focus as compared to annular illumination. This larger contrast implies that the MEEF for the optimized illumination configuration is lower compared to annular illumination and that the exposure latitude for the optimized illumination configuration is higher. Another benefit of the optimized illumination configuration is the improved line end performance as compared to annular illumination. The top down images in Figure 8 show that the optimized illumination configuration is capable of maintaining the EOL without extending the line on the pattern, which is advantageous for more aggressive design rule shrinks.

Example 3: The results in Figures 7 and 8 for binary mask (BIM) were compared to simulation results for chromeless mask (CLM). A chromeless brick wall isolation pattern was designed from experimental results of software simulation in a manner known to those skilled in the art. The chromeless technology requires (0,0) order light so as to fully benefit from the DOF improvement produced by off axis illumination. Experimental results from the simulation confirm the need for (0,0) order light for which purpose the isolation layer should be dithered or half toned. The half tone pitch may be chosen such that the first order in the dithered direction does not fall into the projection pupil. In the example, the lines were dithered in the vertical direction with pitch less than $\lambda/[NA(1+\sigma_{out})]$. The dithering duty cycle however should be tuned to optimize the amount of (0,0) order light for best DOF and pattern fidelity. In the simulation results for CLM the half tone pitch was 155nm with 50% duty cycle (77.5nm

chrome islands). This pitch substantially prevented the $(0,\pm1)$ orders from entering the projection pupil; however, this duty cycle should be tuned to maximum DOF with computer aided design tools.

Example 4: Simulation results for the 130nm design rule layer were plotted for a CLM with 155nm half-tone pitch and 50% duty cycle. The CLM was exposed on a $\lambda=248\text{nm}$ apparatus with NA of 0.8 and annular illumination ($\sigma_{\text{in}}=0.58$ and $\sigma_{\text{out}}=0.88$). The CLM with this annular setting had $0.5\mu\text{m}$ DOF ($-0.4\mu\text{m}$ focus to $+0.1\mu\text{m}$ focus). The CLM with annular illumination had greater DOF and better contrast through focus as compared to BIM with annular illumination. This indicates that the CLM performed better than the BIM mask. The top down simulation results indicated that the EOL performance with CLM is theoretically better than the EOL performance with BIM and that the CLM was also able to better define the contact hole landing area as compared to BIM.

Example 5: Simulation results for 130nm brick wall isolation pattern isolation layer were plotted for $\lambda=248\text{nm}$ apparatus with NA of 0.8 and the optimized elliptical dipole shown in Figure 6. These results were simulated with a reticle identical to the CLM reticle used in the preceding example, which has a 155nm half-tone pitch and 50% duty cycle. The CLM exposed with this optimized illumination configuration had $0.7\mu\text{m}$ DOF ($-0.5\mu\text{m}$ to $+0.2\mu\text{m}$), an improvement of 40%. The Bossung plots indicated that the isofocal intensity was around 0.21. A model based OPC approach could additionally be applied in order to tune the reticle to size at the correct linewidth, providing further improvements in performance. The linewidth may be corrected, for example, by biasing and by modifying the half tone duty cycle. The top down simulation results indicated that CLM was able to define the contact landing region and was able to maintain CD uniformity. Necking and other linewidth inconsistencies were reduced with this elliptical illumination configuration. Furthermore, the CLM reticle could be biased to improve the DOF, and consequently the EOL performance should improve. Furthermore, model based OPC should be able to correct the EOL further.

Example 6: Using the mask pattern of Figure 2 for a 110nm design rule isolation layer, an optimized illumination configuration was generated with Equations

13 and 15. In order to visualize sampling of the illumination pupil, $J_{\text{opt-2D}}$ is plotted in Figure 9, showing x orders ($\eta=m+p$) horizontally and y orders ($\xi=n+q$) vertically. As in Figure 4 for the 130nm design rule, the largest contribution to 110nm design rule in Figure 11 is the ($\eta=0, \xi=0$) order. This (0,0) order light is detrimental to the DOF and is eliminated in J_{tot} as indicated in Equation 15. Figure 9 also shows that the ($\pm 1, \pm 1$) orders are the largest contributors to the illumination configuration optimization rather than the ($\pm 2, 0$) order. This is due to the fact that 110nm design rule is too aggressive for the 248nm apparatus with $\text{NA}=0.8$, as slightly higher NA is preferred to achieve this resolution. The orders that contribute most to defining the isolation linewidth are the ($\pm 2, 0$) orders. The ($\pm 2, 0$) orders, however, are at the far edge of the illumination configuration ($0.8 < \sigma < 1.0$), which indicates that σ of 1 may provide improvement to implement the 110nm design rule at this wavelength.

Using Equation 15 and the results in Figure 9, the optimized illumination configuration for the 110nm brick wall isolation layer is shown in Figure 10. Figure 10 shows that the illumination configuration areas that contribute most to image formation are a small portion in the center and far edges of the illumination configuration. One possible implementation of this illumination configuration is plotted in Figure 11a. In order to use 248nm apparatus to print more aggressive design rules and push the limit of the projection numerical aperture, an illumination configuration with σ of 1.0, as shown in Figure 11b, and with small sectors (σ ring width of 0.2) may be used.

An implementation of the present invention includes selection of cells or particular gates that are critical. These critical features are then processed to determine J_{tot} as described above. In Section 1, it was shown that the illumination configuration is pattern dependent. Therefore, if the pitch does not differ significantly for the critical features, it is possible to create a single illumination configuration which optimizes the process window for all the critical features. In Figure 12, an example of a circuit with critical gates g_1, g_2, g_3 and a critical cell cc is shown. The diffraction orders of these tagged critical features can be calculated, and by using the theory already described, the optimized illumination configuration can be calculated. After calculating the optimized

illumination configuration the process window can be calculated and compared to the process window with other illumination configurations.

Another method of optimizing illumination/pattern interaction is to modify the pattern design with scattering bars. Scattering bars discretize the pitch from a semi-continuous function for an ASIC or logic design. After placing scattering bars, there are fewer pitches. This can be demonstrated in simulation software by placing the scattering bars with an edge-to-edge separation of $0.61\lambda/\text{NA}$. In Figure 13, the design in Figure 12 has been modified by adding a plurality of scattering bars. The illumination configuration can then be optimized for the modified design. The process window performance of an illumination configuration optimized for a design with scattering bars can then be compared to the process window of an illumination configuration optimized without scattering bars. Since a design with scattering bars discretizes the pitch, the combination of scattering bars with optimized off axis illumination (OAI) will have the largest possible DOF process window.

Another concept for implementing illumination configuration optimization is through the placing of scattering bars based on space width (SW) considerations. A scattering bar is placed through rule based OPC which rules may be defined by the space width. With simulation software, it should be possible to calculate the probability density function (pdf) of the space width without scattering bars and with scattering bars. The illumination can then be optimized by considering the pdf by modifying $J_{\text{opt-2D}}$ as shown in Equation 16. Assuming that the vertical lines and horizontal lines are infinite, it is also possible to calculate the diffraction orders $T(m,n)$. In Equation 17, the diffraction orders are calculated as a function of m and n where w is the line width, τ is the intensity transmittance of the reticle, and $P_x = SW_x + w$ and $P_y = SW_y + w$ are the pitches in the x and y directions, respectively.

$$\begin{aligned}
J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) = \\
J_s(\alpha, \beta) \sum_{m=-P_{max}}^{+P_{max}} \sum_{n=-P_{max}}^{+P_{max}} \int \int dP_x dP_y pdf(P_x) pdf(P_y) T(m, n) T^*[-(\eta - m), -(\xi - n)] \\
\cdot K\left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA}\right) K^*\left(\alpha - (\eta - m)\frac{\lambda}{P_x NA}, \beta - (\xi - n)\frac{\lambda}{P_y NA}\right) \quad \text{Eqn. 16}
\end{aligned}$$

Equation 17 is a matrix of four equations for which, in order of presentation, $m=n=0$; $m=0, n \neq 0$; $m \neq 0, n=0$; and $m \neq 0, n \neq 0$.

$$T(m, n) = \begin{cases} 1 - w \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \left\{ \frac{1}{P_x} + \frac{1}{P_y} \right\} + \frac{w^2}{P_x P_y} \left(1 + \sqrt{\tau}\right)^2 \\ \left[1 - \frac{w}{P_x} \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \right] \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \left\{ \frac{P_y}{\pi n} \right\} \sin \left(n \frac{\pi w}{P_y} \right) \\ \left[1 - \frac{w}{P_y} \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \right] \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \left\{ \frac{P_x}{\pi m} \right\} \sin \left(m \frac{\pi w}{P_x} \right) \\ \left(1 + \sqrt{\tau}\right)^2 \left\{ \frac{P_x}{\pi m} \right\} \sin \left(m \frac{\pi w}{P_x} \right) \left\{ \frac{P_y}{\pi n} \right\} \sin \left(n \frac{\pi w}{P_y} \right) \end{cases} \quad \text{Eqn. 17}$$

Calculating the optimal illumination configuration with the pdf can present some problems as it implies that some pitches are not as important as others. If all the gates in the pdf are considered to be critical, the pdf should be modified by a weighting factor. This weighting factor is a function of pitch called $wf(P_x)$. With this weighting factor, all the critical pitches should be treated the same such that $wf(P_x) \cdot pdf(P_x) = 1$. This weighting factor should be added to Equation 16 by replacing $pdf(P_x)$ in Equation 16 with $wf(P_x) \cdot pdf(P_x)$. In the case that all of the pitches are critical, the weighting factors will not help to resolve the optimization and it is difficult to create an optimized illumination configuration without modifying the (pattern) design.

One solution to this problem is to modify the design by adding scattering bars as discussed above. Scattering bars help to reduce pitches for isolated features. Once scattering bars are added to the design, the previously isolated features tend to act like

dense features. Thus, scattering bars discretize the pitch from a continuous pdf to a more discrete pdf. Figure 14 is an example pdf for a logic pattern with features oriented in the y-direction (i.e. “vertical” direction) in which scattering bars have and have not been applied. Figure 14 shows vertical gate space widths (μm) on the x (horizontal) axis. For the unmodified design, D, without scattering bars, there are three discrete humps in the pdf at space widths of 0.2, 0.6 and 1.5 μm . After the placement of scattering bars, D+SB, the number of pitches has been reduced such that most of the space widths are at dense pitches of 0.2 μm . With this change to the pdf, it is more likely that an illumination configuration can be optimized.

The total illumination configuration for a design with both horizontal (x-direction) and vertical features is the sum of horizontal and vertical illumination configurations. If the illumination configuration is concentrated at σ_x for the vertical features and is concentrated at σ_y for the horizontal features, the optimal illumination configuration will be a “conventional” quadrupole illumination configuration provided that $\sqrt{2}\sigma_x \leq 1$ and that $\sqrt{2}\sigma_y \leq 1$. Otherwise, this type of analysis will result in a four pole illumination configuration that has been rotated 45°.

The illumination technique presented herein may be extended to account for aberrations. Including aberrations allows an operator to determine which part of the illumination configuration couples to the aberration. The amount of coupling is directly related to sensitivity of the image intensity to the aberration. By understanding this coupling, it may be possible to modify the illumination configuration to minimize the aberration sensitivity of a design.

The projection pupil, $K(\alpha, \beta)$, for scalar imaging contains the obliquity factor, defocus, and the exponential of the wavefront represented by the Zernike polynomials. This scalar imaging pupil is shown in Equation 18. This pupil can further be divided into two parts, the unaberrated pupil $K_0(\alpha, \beta)$ and the aberrated pupil (the exponential of the wavefront); these two parts are multiplied together as shown in Equation 19.

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{\left[\frac{1 - (\alpha^2 + \beta^2)/M^2}{1 - (\alpha^2 + \beta^2)} \right]^{1/4}}_{\text{obliquity-factor}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \right]}_{\text{defocus}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right]}_{\text{aberrations}} \quad \text{Eqn. 18}$$

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{K_0(\alpha, \beta)}_{\text{unaberrated}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right]}_{\text{aberrations}} \quad \text{Eqn. 19}$$

where

$$K_0(\alpha, \beta) = \underbrace{\left[\frac{1 - (\alpha^2 + \beta^2)/M^2}{1 - (\alpha^2 + \beta^2)} \right]^{1/4}}_{\text{obliquity-factor}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \right]}_{\text{defocus}} \quad \text{Eqn. 20}$$

$$W(\alpha, \beta) = \sum_{\nu=5}^{37} Z_{\nu} R_{\nu}(\alpha, \beta) \quad \text{Eqn. 21}$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \cong 1 + x \quad \text{Eqn. 22}$$

From Equation 22, the wavefront can be written as a linear approximation, which is shown in Equation 23. By substituting Equation 23 into Equation 22, the linear approximation for the projection pupil, $K(\alpha, \beta)$, can be calculated with Equation 24.

$$\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right] \cong 1 - i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) = 1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{\nu=5}^{37} Z_{\nu} R_{\nu}(\alpha, \beta) \quad \text{Eqn. 23}$$

$$K(\alpha, \beta) \cong K_0(\alpha, \beta) \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v(\alpha, \beta) \right] \quad \text{Eqn. 24}$$

Since the TCC is a function of the projection pupil, $K(\alpha, \beta)$, the linear approximation to the pupil in Equation 24 implies that the TCC can be represented by a linear approximation. This is accomplished by substituting Equation 24 into Equation 1, which results in Equation 25. Once again by neglecting the terms of power 2 or greater, the TCC in Equation 25 can be simplified as shown in Equation 26.

The wavefront, $W(\alpha, \beta)$, is most often denoted by the summation of Zernike fringe polynomials as shown in Equation 21. Using the linear theory of aberrations, the exponential, e^x , can be represented by a Taylor series expansion. The Taylor series expansion is valid for small x , and previous work has shown good agreement for aerial images when Z_v is less than 0.04λ . The Taylor series expansion for e^x is shown in Equation 22. In Equation 22, terms of power 2 or greater have been dropped, which is valid provided that Z_v is less than 0.04 ($0.04^2=0.0016$ and is negligible).

$$\begin{aligned} TCC(m, n, p, q) \cong & \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \right] \\ & \cdot K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \left[1 + i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \right] d\alpha d\beta \end{aligned} \quad \text{Eqn. 25}$$

$$\begin{aligned} TCC(m, n, p, q) \cong & \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \\ & \cdot \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) + i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \right] d\alpha d\beta \end{aligned} \quad \text{Eqn. 26}$$

By defining the unaberrated TCC, $TCC_0(m,n,p,q)$, and the aberrated TCC, $TCC_v(m,n,p,q)$, in Equations 27 and 28, respectively, the TCC can be represented by a linear function of TCC_0 and TCC_v as shown in Equation 29.

$$TCC_0(m,n,p,q) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) d\alpha d\beta \quad \text{Eqn. 27}$$

$$TCC_v(m,n,p,q) = -i \frac{2\pi}{\lambda} \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \quad \text{Eqn. 28}$$

$$TCC(m,n,p,q) \equiv TCC_0(m,n,p,q) + \sum_{v=5}^{37} Z_v [TCC_v(m,n,p,q) + TCC_v^*(-p,-q,-m,-n)] \quad \text{Eqn. 29}$$

Since the TCC can be constructed as a linear approximation as shown in Equation 29, J_{opt} can also be written as a linear approximation. The linear approximation to J_{opt} is derived in Equation 30 by using Equation 8 for J_{opt} and by following the methodology for the linear approximation of the TCC as outlined in Equations 18 through 29.

$$J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \equiv J_s(\alpha, \beta) T(m, n) T^*(-p, -q) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \\ \cdot \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) + i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \right] d\alpha d\beta \quad \text{Eqn. 30}$$

Equation 30 for J_{opt} can then be divided into a summation of the unaberrated J_{opt0} with the aberrated J_{optv} as shown in Equation 33. The definition of J_{opt0} and J_{optv} are shown in Equations 31 and 32, respectively.

$$J_{opt0}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right)$$

Eqn. 31

$$J_{optv}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = -i \frac{2\pi}{\lambda} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right)$$

Eqn. 32

$$\cdot K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right)$$

Equation 32 describes the portion of the illumination configuration which couples to a particular aberration. The amount of coupling affects the image intensity and helps to provide an understanding of aberration sensitivity to illumination. By combining Equations 31 and 32, J_{opt} can be written as a linear approximation.

$$J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \cong J_{opt0}(\alpha, \beta, m, n, p, q) + \sum_{v=1}^{37} Z_v \left[J_{optv}(\alpha, \beta, m, n, p, q) + J_{optv}^*(\alpha, \beta, -p, -q, -m, -n) \right]$$

Eqn. 33

In another aspect of the present invention, weighting factors can be introduced to maximize or to minimize a response to a particular metric including, for example, depth of focus (DOF), image log slope (ILS), image slope (IS), or aberration sensitivity. The optimal J_{tot} of Equation 15 can be modified to include these weighting factors as shown in Equation 34.

$$J_{tot}(\alpha, \beta) = \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q w(\alpha, \beta, m, n, p, q) J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \quad \text{Eqn. 34}$$

In general, photoresists react in proportion to the logarithm of the intensity of the light impinging thereon. As the intensity, and therefore the logarithm of the intensity, increases, the feature will be printed into the resist with better fidelity (i.e. improved resist profile and improved process window). Therefore, it is desirable to maximize the logarithmic change in intensity (ILS). The ILS is defined in Equation 35.

$$ILS \propto \frac{\partial \ln I}{\partial x} = \frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial x} \quad \text{Eqn. 35}$$

Since the derivative of the intensity changes faster than the inverse of intensity, Equation 35 will increase more by increasing the derivative of the intensity. The intensity can be calculated from Equation 3 and the derivative of the intensity with respect to x is defined in Equation 36. The derivative with respect to x results in the weighting function, w_x , as shown in Equation 37. Likewise, a weighting function w_y can be defined with respect to y as shown in Equation 38.

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(x, y)}{\partial x} &= \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q i \frac{2\pi}{P_x} (m+p) e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} DOCC(m, n, p, q) \\ &= \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q w_x(m, p) e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} DOCC(m, n, p, q) \end{aligned} \quad \text{Eqn. 36}$$

$$w_x = i \frac{2\pi}{P_x} (m+p) \quad \text{Eqn. 37}$$

$$w_y = i \frac{2\pi}{P_y} (n+q) \quad \text{Eqn. 38}$$

Since pattern features and intensity features are two dimensional, the norm of the gradient may be used to indicate the change in intensity with respect to position. The norm of the intensity gradient is defined in Equation 39. This allows us to define a weighting function to calculate J_{int} in Equation 34. The weighting function to maximize the image log slope is defined by Equation 40.

$$\|\nabla I\| \Rightarrow w_{NLS} = \sqrt{|w_x|^2 + |w_y|^2} \quad \text{Eqn. 39}$$

$$w_{ILS}(m, n, p, q) = 2\pi \sqrt{\left(\frac{m+p}{P_x} \right)^2 + \left(\frac{n+q}{P_y} \right)^2} \quad \text{Eqn. 40}$$

Equation 40 shows that when $m+p=0$ and $n+q=0$, the weighting function becomes 0. When $m+p=0$ and $n+q=0$, these orders contribute nothing to image modulation and reflect DC contributions to the image. Furthermore, w_{ILS} increases as $m+p$ and $n+q$ increase. This implies that higher order diffraction order terms are more highly weighted and contribute more to ILS.

In addition to maximizing ILS, the depth of focus of the process will increase if the ILS is improved such that the intensity response to focus is minimized. The focus is accounted for by the pupil $K(\alpha, \beta)$. The pupil, $K(\alpha, \beta)$, is shown in Equation 41, where focus is denoted z . Equation 41 can be divided into two terms, terms dependant on z (the defocus term) and terms independent of z (the non-defocus term), as shown in Equation 42.

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{\left[\frac{1 - (\alpha^2 + \beta^2)/M^2}{1 - (\alpha^2 + \beta^2)} \right]^{1/4}}_{\text{obliquity factor}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \right]}_{\text{defocus}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right]}_{\text{aberrations}} \quad \text{Eqn. 41}$$

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{K_{nd}(\alpha, \beta)}_{\text{non-defocused}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \right]}_{\text{defocus}} = K_{nd}(\alpha, \beta) K_d(\alpha, \beta) \quad \text{Eqn. 42}$$

The variation in intensity due to focus, z , can be minimized by setting the derivative of intensity with respect to z to zero. By substituting Equation 42 into Equations 1 through 3, a cost function $f(\alpha, \beta, z)$ can be defined as shown in Equation 43 which is the cost function of the intensity imaging terms which depend on z .

$$f(\alpha, \beta, z) = K_d \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_d^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \quad \text{Eqn. 43}$$

The cost function, $f(\alpha, \beta, z)$, is in turn minimized when $g(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ equals zero (see Equation 44, below). In Equation 44 the phase terms have been removed as the derivative with respect to z equals zero only when the magnitude terms equal zero.

When $g(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ is zero, the areas (α, β) of the pupil for a given order (m, n, p, q) are minimally sensitive to focus. These are the most desired areas of the pupil for constructing the illumination configuration. A weighting function, $w_{\text{focus}}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$, is defined in Equation 45. This weighting function is equal to 1 for areas least sensitive to focus and is equal 0 for areas most sensitive to focus. A new weighting function which maximizes ILS through focus can then be defined by Equation 46 and used to modify the illumination configuration.

$$g(\alpha, \beta, m, n, p, q) = \frac{\partial}{\partial z} f(\alpha, \beta, z)$$

$$= \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA} \right)^2 - \left(\beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right)^2} + i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA} \right)^2 - \left(\beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right)^2} \right]$$

Eqn. 44

$$w_{\text{focus}}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = 1 - |g(\alpha, \beta, m, n, p, q)|$$

Eqn. 45

$$w(\alpha, \beta, m, n, p, q) = w_{\text{ILS}}(m, n, p, q) w_{\text{focus}}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

Eqn. 46

The above methodology allows the sensitivity of the intensity to be minimized to the influence of focus, an aberration. Since the impact of focus on intensity can be minimized, the impact of intensity can be minimized to a specific aberration. This is desirable for certain patterns which demonstrate a high sensitivity to a particular aberration. The projection pupil in Equation 19 can be written as an unaberrated term, $K_0(\alpha, \beta)$, multiplied by an aberrated term, $K_s(\alpha, \beta)$ as shown in Equation 47.

$$K(\alpha, \beta) = K_0(\alpha, \beta) K_s(\alpha, \beta)$$

Eqn. 47

The sensitivity of the intensity to a particular aberration Z_i can be minimized by setting the derivative of the intensity with respect to Z_i to zero. By substituting

Equation 47 into Equations 1 through 3 and taking the derivative of the intensity, the aberration sensitivity is minimized when $h(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ in Equation 48 is equal to zero.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial Z_i} I(x, y) = 0 \Rightarrow \\ h(\alpha, \beta, m, n, p, q) = K_a \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \frac{\partial}{\partial Z_i} K_a \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial Z_i} K_a \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_a \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) = 0 \end{aligned}$$

Eqn. 48

$$h(\alpha, \beta, m, n, p, q) = \left[R_i \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) - R_i \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \right] = 0$$

Eqn. 49

Equation 48 may be simplified and written as Equation 49. A weighting function $w_{ab}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ is defined in Equation 50, which equates to 1 for areas (α, β) of the pupil that are least sensitive to Z_i and to 0 for areas most sensitive to Z_i .

$$w_{ab}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = 1 - \frac{1}{2} |h(\alpha, \beta, m, n, p, q)|$$

Eqn. 50

The weighting function to minimize ILS sensitivity to a particular aberration, Z_s , can then be defined in Equation 51. Furthermore, a weighting function to minimize ILS sensitivity to a particular aberration, Z_p , and to maximize ILS through focus can also be defined in Equation 52. Either of these equations can be substituted into Equation 34 to calculate the illuminator with the optimal response to a given metric.

$$w(\alpha, \beta, m, n, p, q) = w_{ILS}(m, n, p, q) w_{ab}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

Eqn. 51

$$w(\alpha, \beta, m, n, p, q) = w_{NLS}(m, n, p, q) w_{focus}(\alpha, \beta, m, n, p, q) w_{ab}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

Eqn. 52

Figure 15 is a schematic representation of an example of a lithography apparatus for use according to the present invention. The apparatus includes a radiation system. The radiation system is made up of a lamp LA (which may be an excimer laser, for example) and an illumination system which may comprise beam shaping optics EX, an integrator IN, and a condenser lens CO, for example. The radiation system supplies a projection beam PB of radiation. For example, the radiation system may provide ultraviolet, deep ultraviolet or extreme ultraviolet radiation. In general, the radiation system may also provide soft x-ray or other forms of radiation.

A first object table, or mask table MT holds a mask MA. The mask MA includes a pattern area C which contains the mask pattern to be imaged. The mask table MT is movable relative to the projection beam PB so that different portions of the mask may be irradiated. Alignment marks M₁ and M₂ are used for determining whether the mask is properly aligned with the substrate, or wafer, W.

A projection system PL projects the projection beam PB onto the wafer W. The wafer W includes two alignment marks P₁ and P₂ which are aligned with the marks M₁ and M₂ prior to beginning imaging. The wafer W is supported by a substrate table WT which is moveable relative to the projection beam for exposing different parts of the wafer W; in this way, the mask pattern C may be imaged onto different target portions c of the wafer W. An interferometric position monitor IF is used to insure that the wafer table WT is in the correct position relative to the position of the mask table MT.

While the invention has been described in connection with particular embodiments, it is to be understood that the invention is not limited to the disclosed embodiments, but on the contrary it is intended to cover various modifications and equivalent arrangement included within the scope of the claims which follow.

4 Brief Description of Drawings

Figure 1 is a diagram of the transmission cross coefficient function for a generalized image forming system;

Figure 2 is an example of a brick wall isolation pattern microlithographic mask feature;

Figure 3 is a representation of the diffraction orders of the mask feature of Figure 2;

Figure 4 is a map of the calculated optimized four dimensional illumination configuration for the mask feature of Figure 2;

Figure 5 is a calculated starting gray scale illumination configuration (J_{in}) for the mask feature of Figure 2;

Figure 6 is a binary representation of the illumination configuration of Figure 5;

Figure 7 shows analysis of a print of the mask feature of Figure 2 printed with an annular illumination configuration;

Figure 8 shows analysis of a print of the mask feature of Figure 2 printed with an optimized elliptical illumination configuration;

Figure 9 is a map of the calculated optimized four dimensional illumination configuration for the mask feature of Figure 2 scaled to 110nm design rules;

Figure 10 is a calculated starting gray scale illumination configuration for the mask feature of Figure 2 scaled to 110nm design rules;

Figures 11a and 11b are binary representations of the illumination configuration of Figure 10 with differing values of σ ;

Figure 12 is an example of a mask pattern with critical gates and cells indicated;

Figure 13 is the mask pattern of Figure 12 with assist features added to reduce the number of pitches in the pattern;

Figure 14 compares probability density functions of space widths of the mask patterns of Figures 12 and 13; and

Figure 15 is a schematic representation of an apparatus for microphotolithography.

In the various Figures, like parts are identified by like references.

Fig.1.

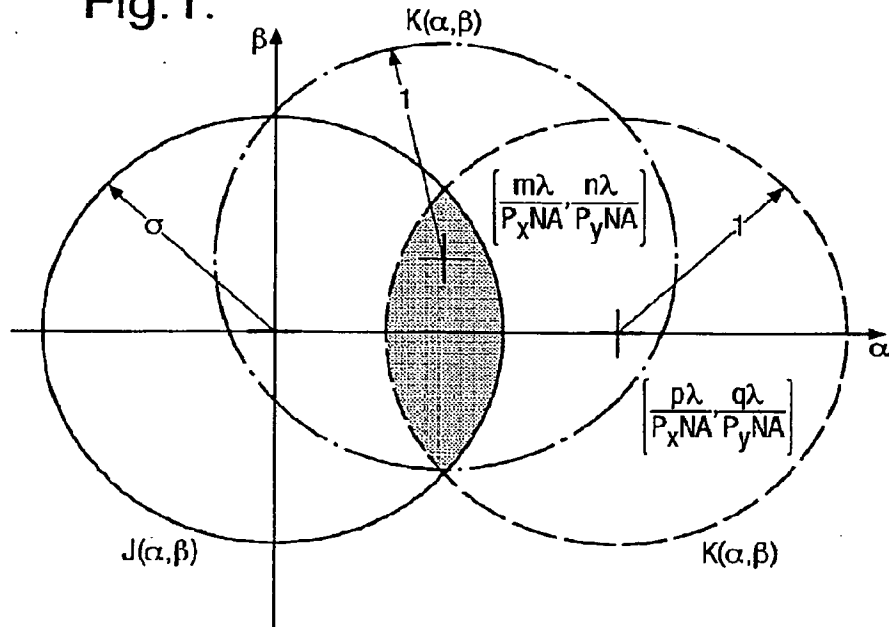
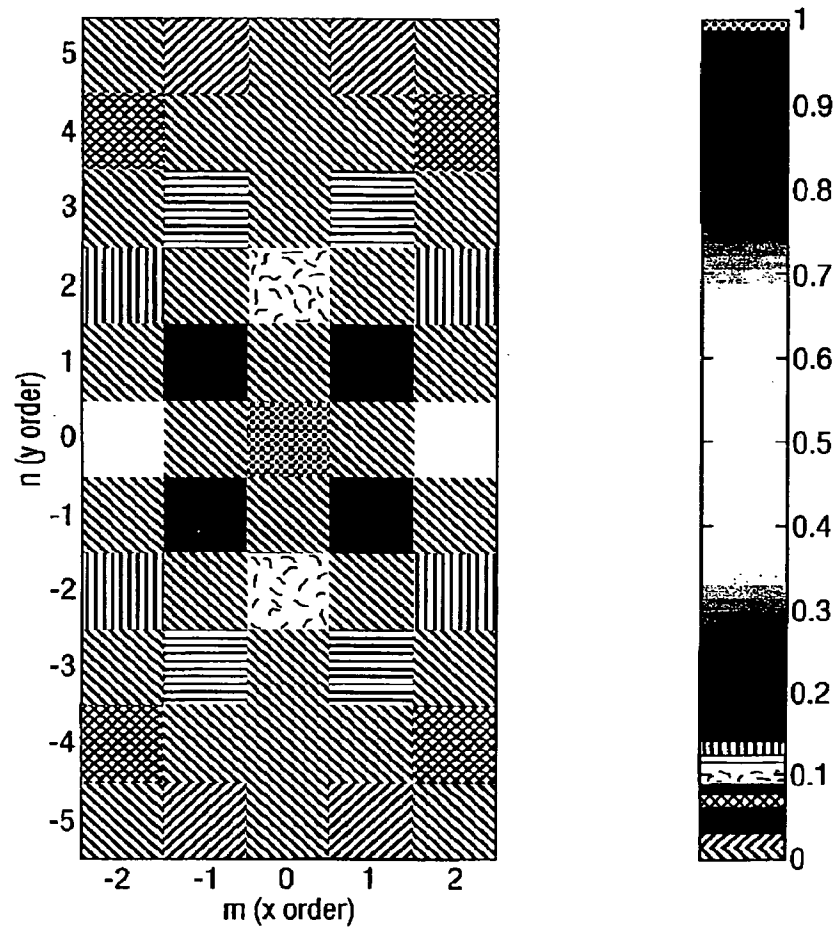


Fig.2.



Fig.3.



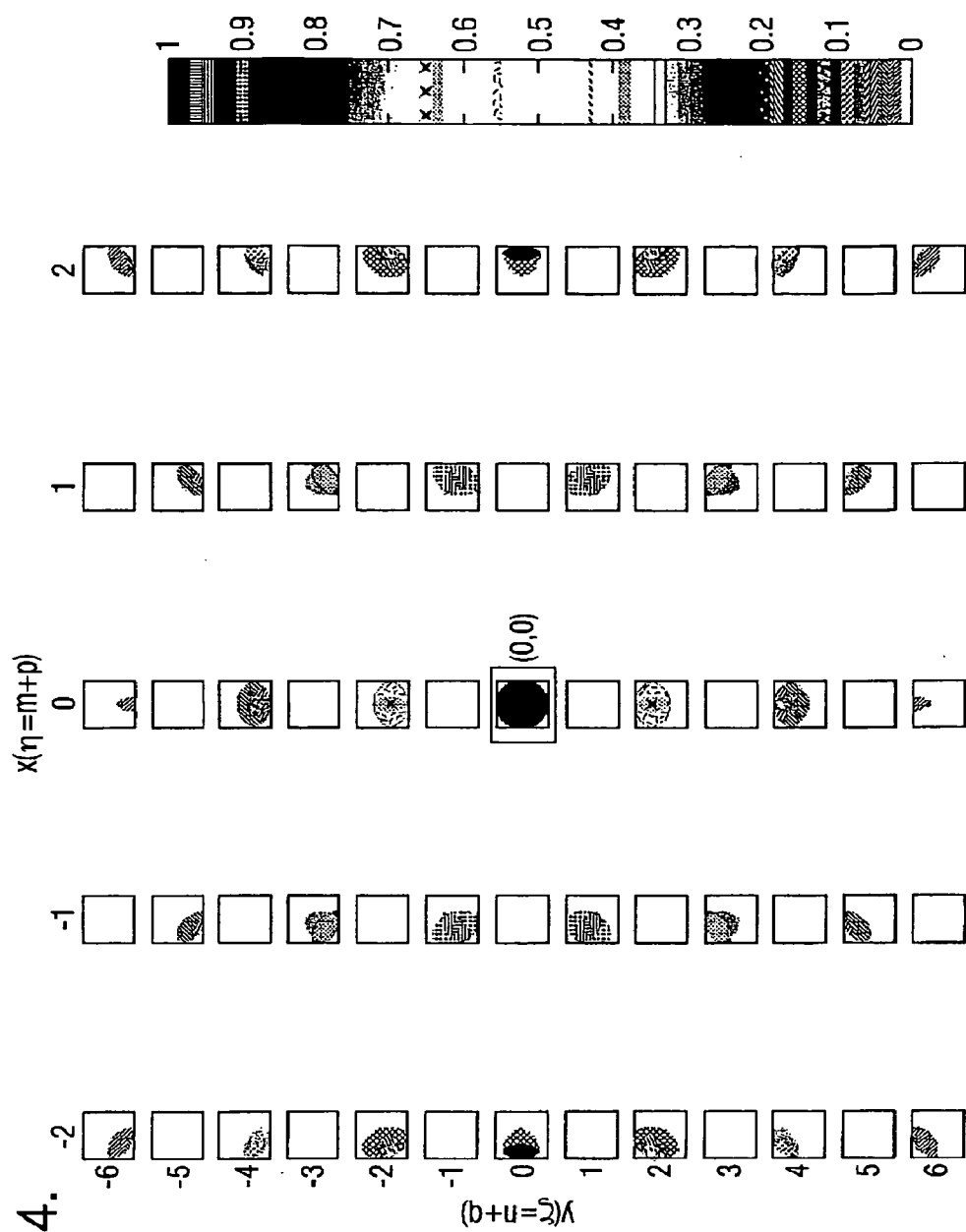


Fig.5.

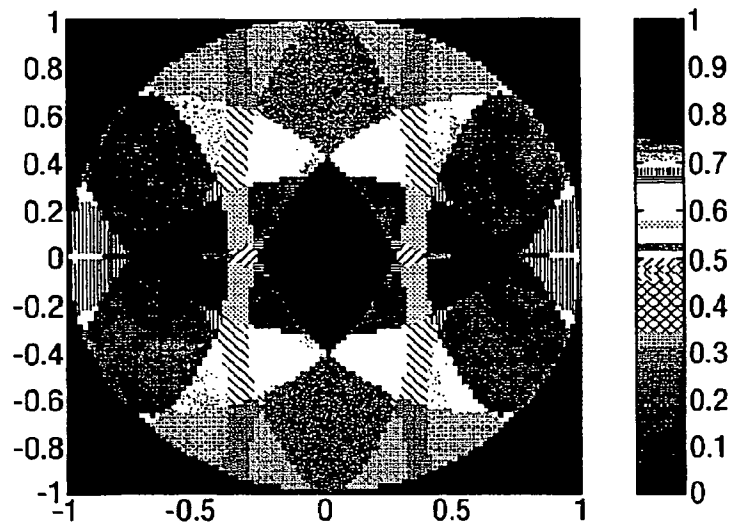
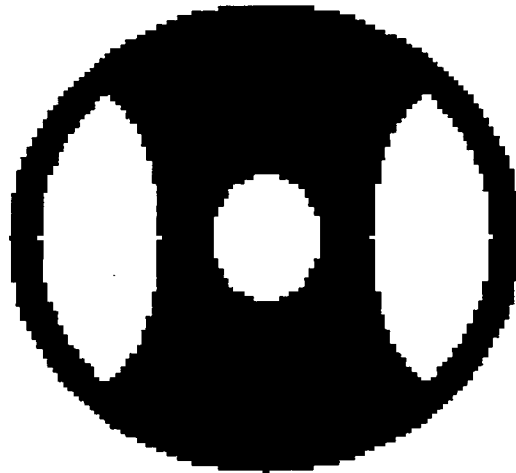


Fig.6.



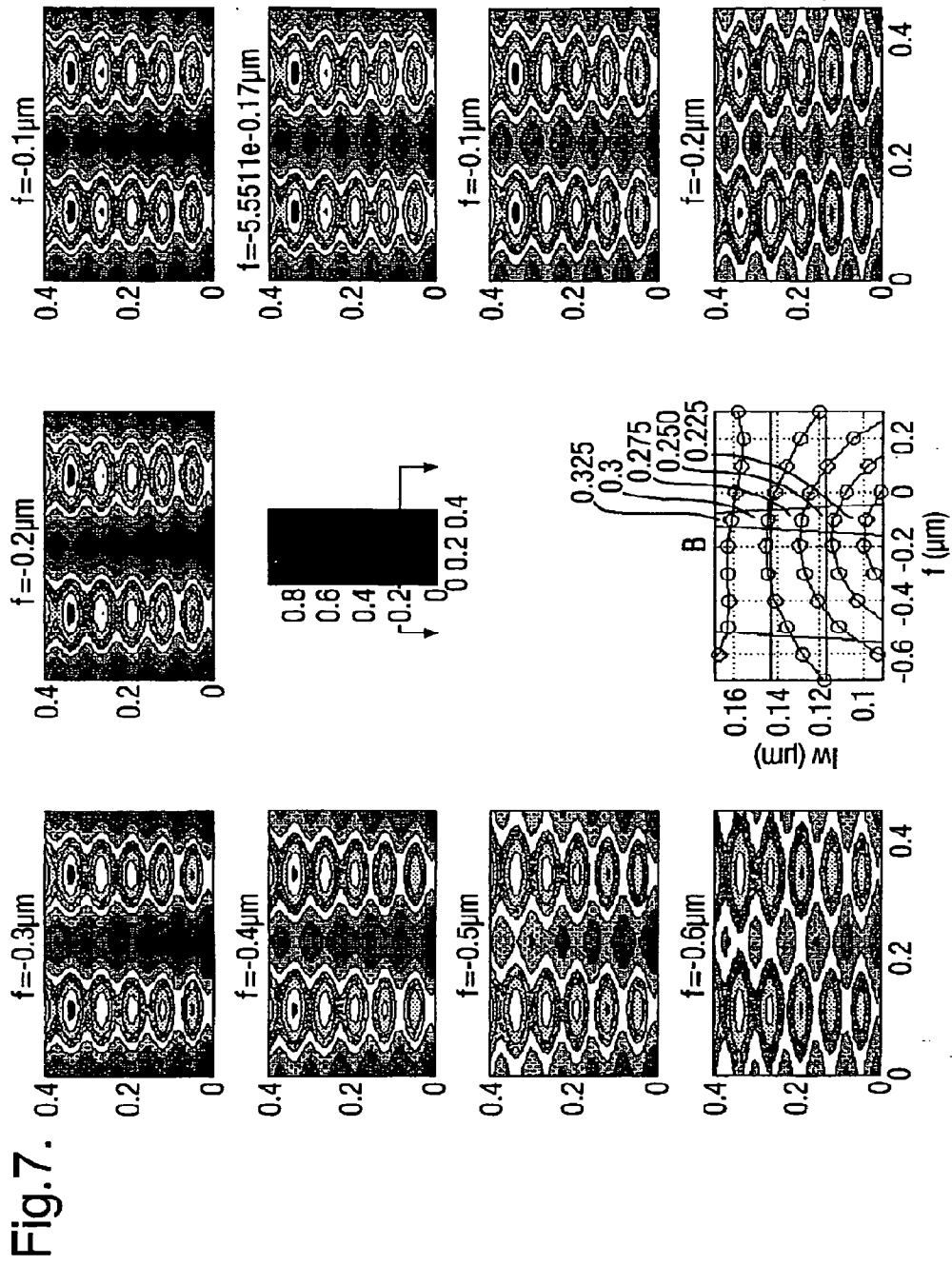
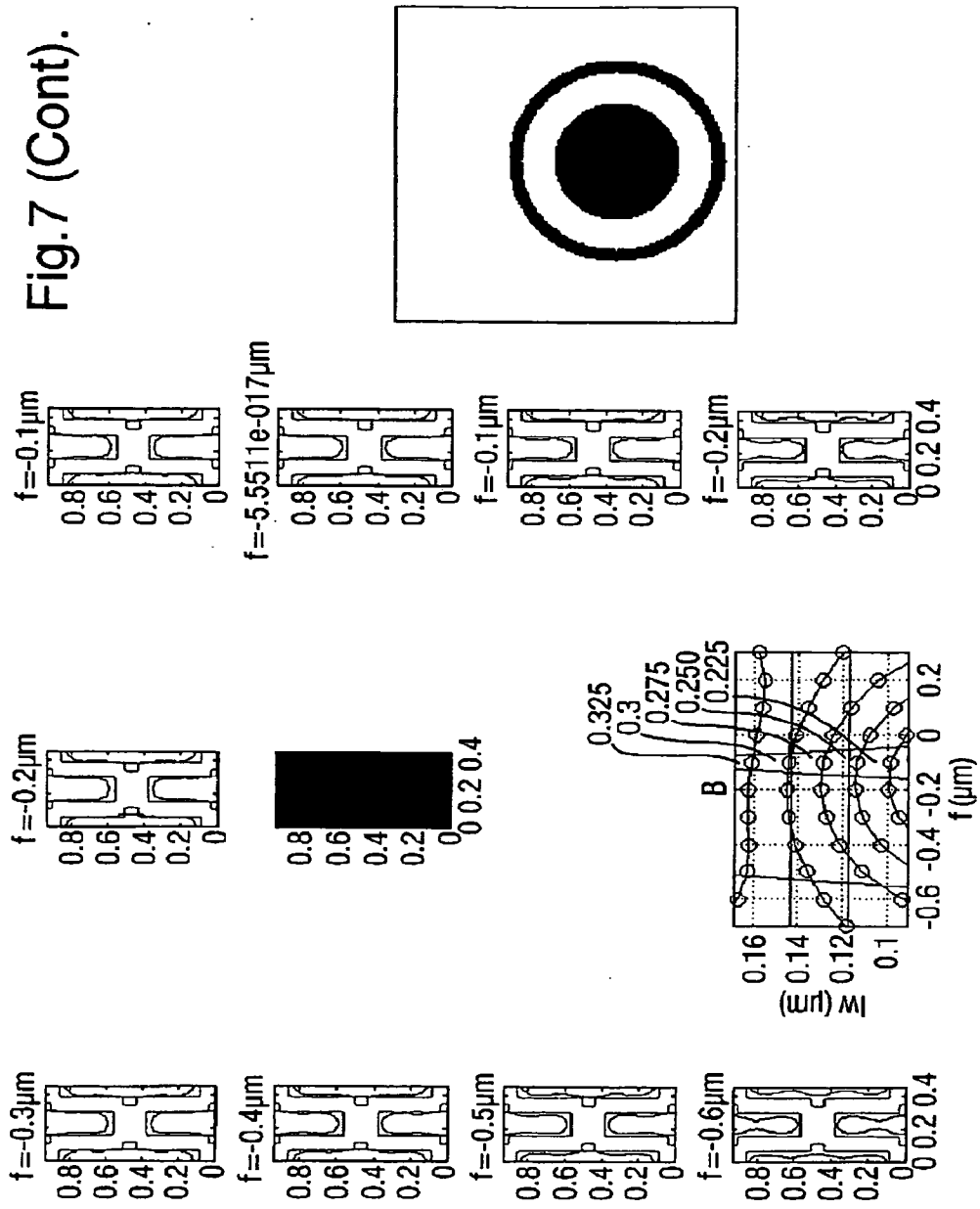


Fig.7 (Cont).



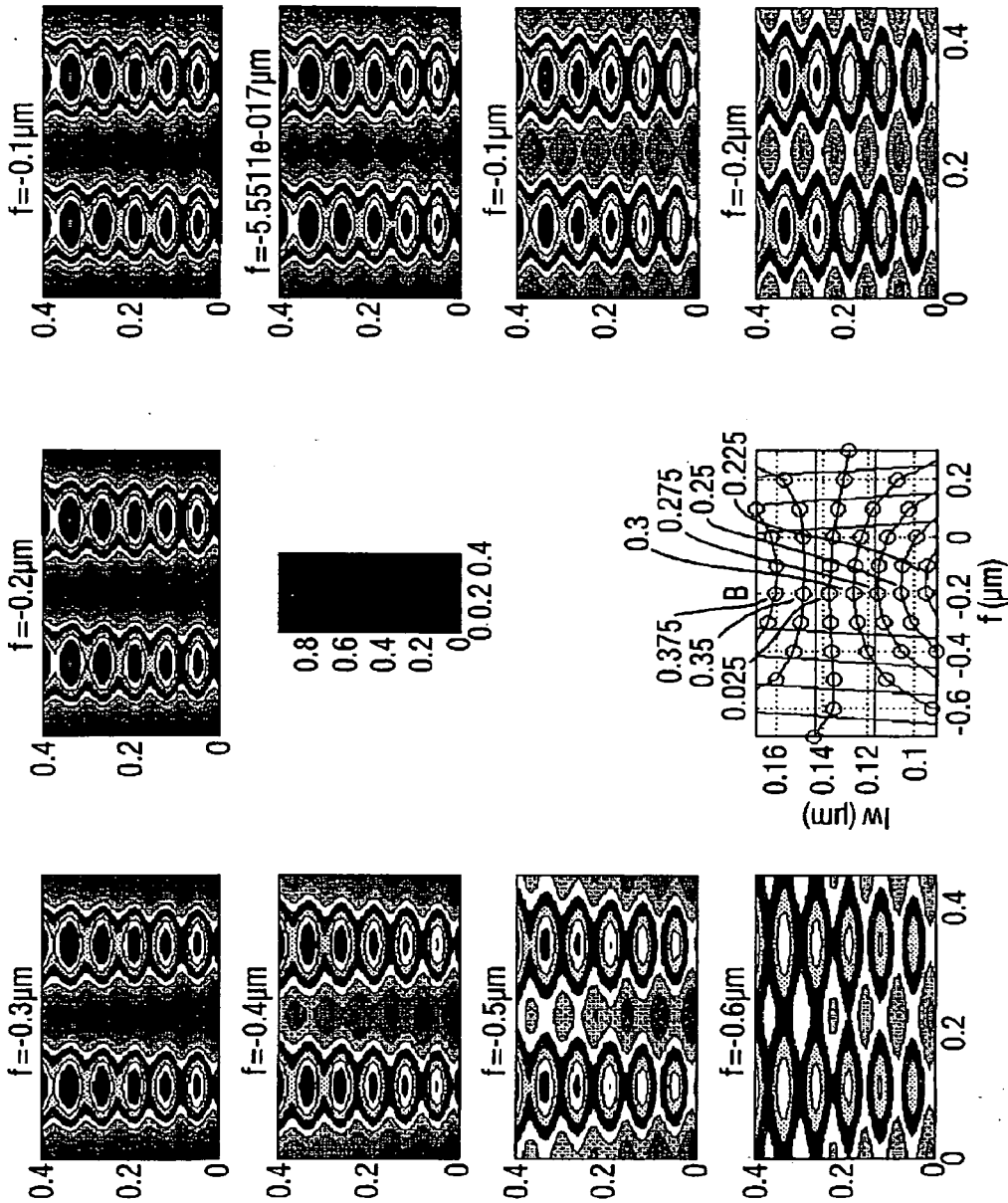
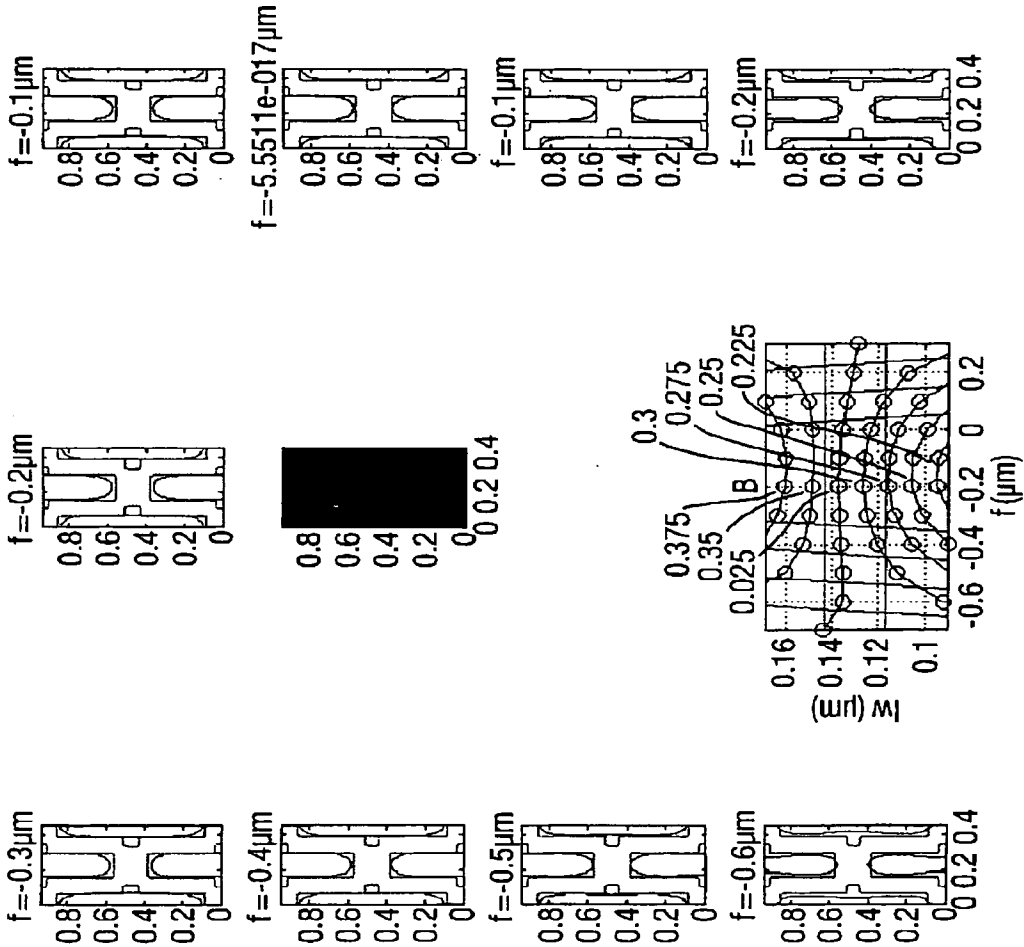


Fig.8.

Fig.8 (Cont).



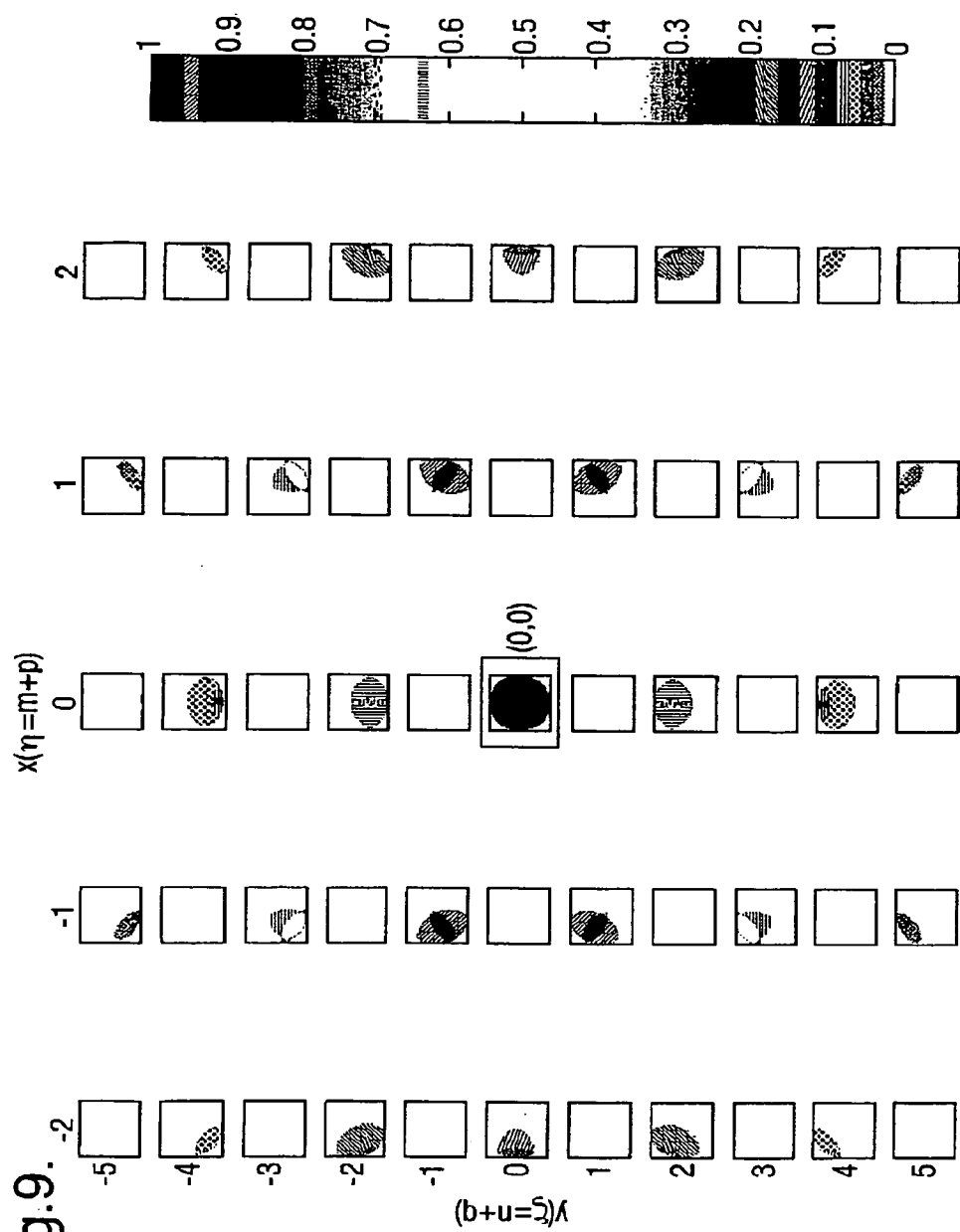


Fig.10.

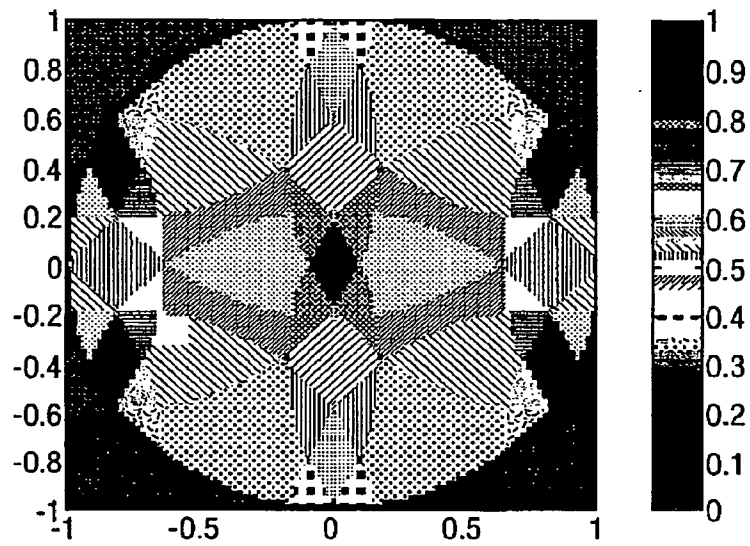


Fig.11a.

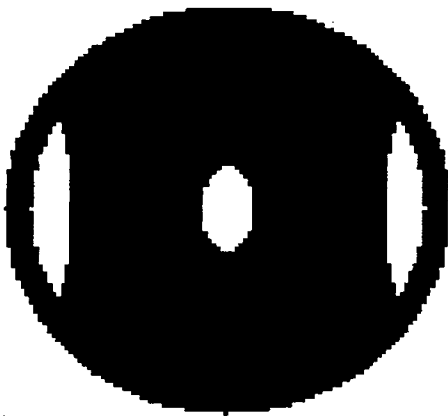


Fig.11b.

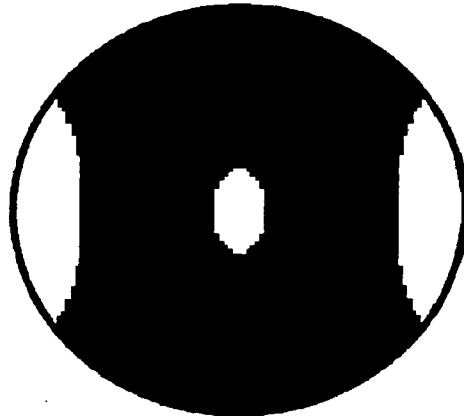


Fig.12.

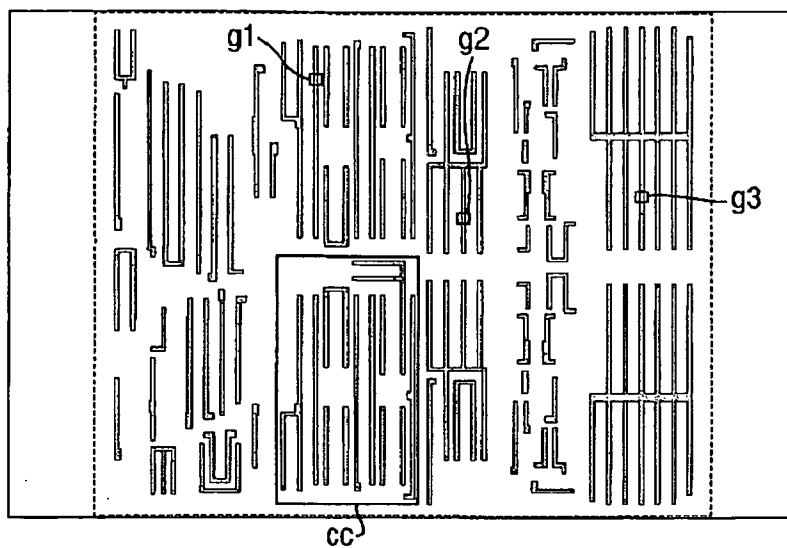


Fig.13.

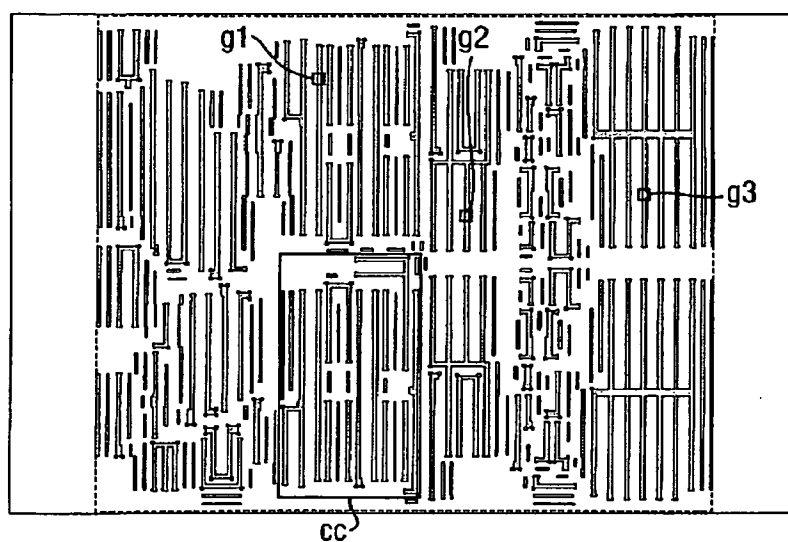


Fig.14.

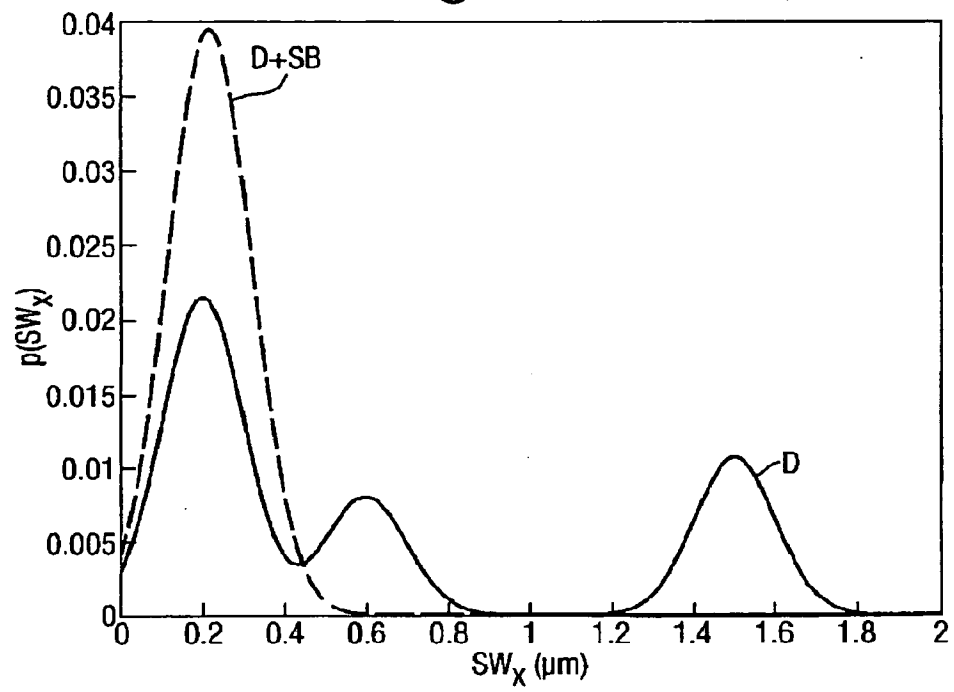
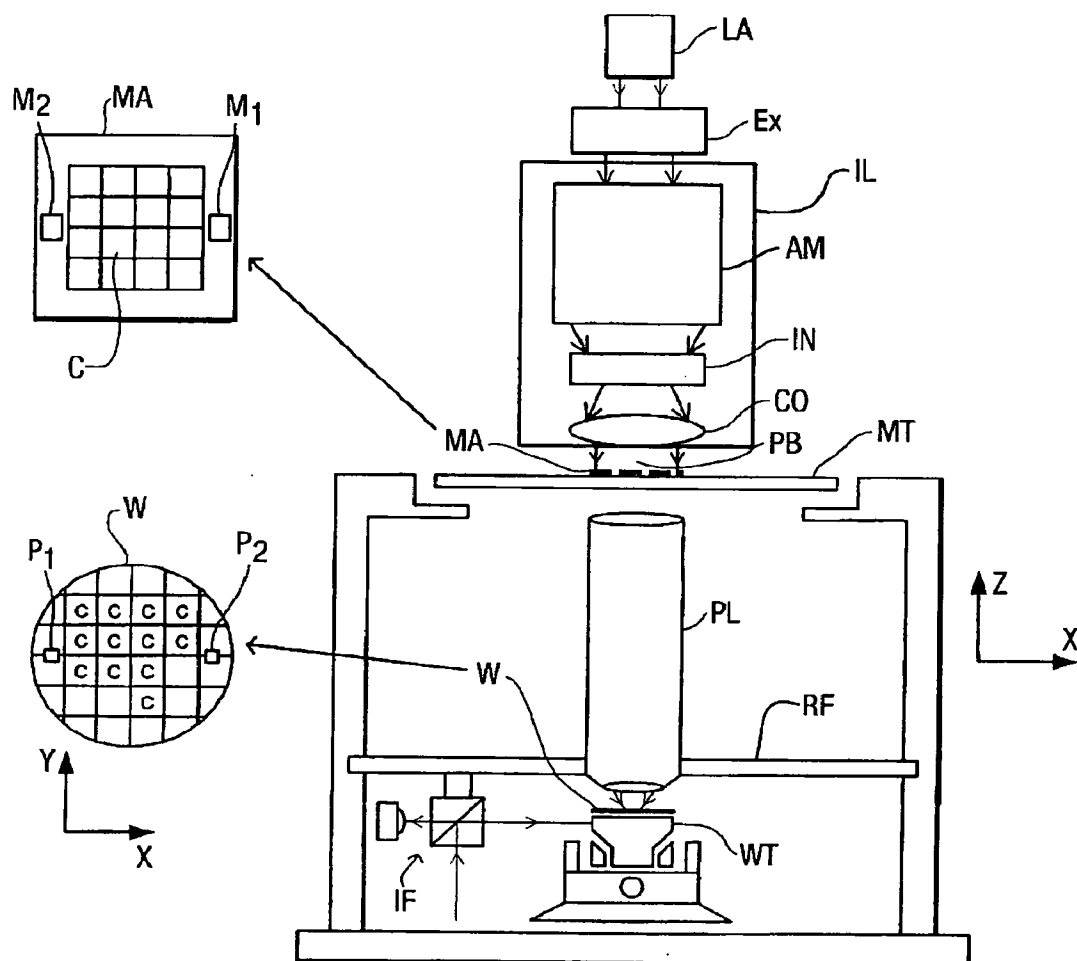


Fig.15.



1 Abstract

A method and apparatus for microlithography. The method and apparatus include optimizing illumination modes based on characteristics of a specific mask pattern. The illumination is optimized by determining an appropriate illumination mode based on diffraction orders of the reticle, and the autocorrelation of the projection optic. By elimination of parts of the illumination pattern which have no influence on modulation, excess DC light can be reduced, thereby improving depth of focus. Optimization of mask patterns includes addition of sub-resolution features to reduce pitches and discretize the probability density function of the space width.

2 Representative Drawing

Fig. 1

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-334836
(P2002-334836A)

(43) 公開日 平成14年11月22日 (2002. 11. 22)

(51) Int.Cl. ¹	識別記号	F I	テームコード* (参考)
H 0 1 L 21/027		G 0 3 F 7/20	5 2 1 5 F 0 4 6
G 0 3 F 7/20	5 2 1	H 0 1 L 21/30	5 2 7
			5 0 2 G

審査請求 未請求 請求項の数16 O L 外国語出願 (全 72 頁)

(21) 出願番号 特願2002-97334(P2002-97334)

(22) 出願日 平成14年2月22日 (2002. 2. 22)

(31) 優先権主張番号 2 7 1 3 0 5

(32) 優先日 平成13年2月23日 (2001. 2. 23)

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 502010332
エイエスエムエル ネザランドズ ベスロ
ーテン フェンノートシャップ
オランダ国 フェルトホーフエン、デ
ルン 1110

(72) 発明者 ロバート ジョン ソカ
アメリカ合衆国 カリフォルニア、キャン
ベル、モンテ ヴィラ コート 137

(74) 代理人 100066692
弁理士 浅村 皓 (外3名)

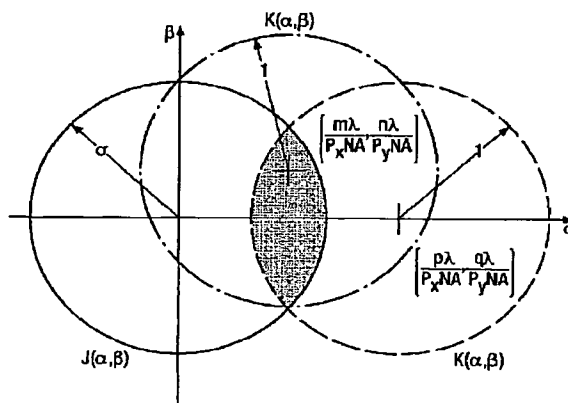
F ターム (参考) 5F046 BA04 CB17 CB23 DA30 DB05

(54) 【発明の名称】 特定のマスク・パターンのための照明の最適化

(57) 【要約】

【課題】 選択したパターンニング手段のパターンのための照明プロファイルを最適化する方法および装置を提供する。

【解決手段】 マイクロリソグラフィのための方法および装置。この方法および装置は、特定のマスク・パターンの特徴に基づいて照明モードを最適化することを含む。照明は、レチクルの回折オーダーに基づいて適切な照明モードを決定すること、および投影光学系の自己相関によって、最適化される。変調に何の影響ももたない照明パターンの部分を除去することで、余分なDC光を減じることができ、これによって焦点深度を改善する。マスク・パターンの最適化には、サブレゾリューションのフィーチャを追加してピッチを減らし、空間幅の確率密度関数を打ち切ることが含まれる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 選択したパターンニング手段のパターンのための照明プロファイルを最適化する方法であって：照明装置および前記選択したパターンニング手段のパターンを含む光学システムのための相互透過係数関数を規定するステップと；前記選択したパターンに基づいて回折オーダーの結像に対する相対的な関連性を求めるステップと；前記相互透過係数から最適化した照明形状を算出し、前記回折オーダーの結像に対する前記相対的な関連性に基づいて前記照明形状の領域に重み付けを行うステップと；を備える照明プロファイルを最適化する方法。

【請求項 2】 前記回折オーダーの結像に対する相対的な関連性を求めるステップは、更に、前記選択したマスク・パターンの特徴的なピッチを求めるステップを備える請求項 1 に記載された方法。

【請求項 3】 更に、前記特徴的なピッチを求めることに先立って、前記選択したパターンのクリティカルな領域を識別するステップを備え、前記選択したパターンの前記特徴的なピッチを求めることは、前記クリティカルな領域の前記特徴的なピッチを求めることによって行われる請求項 2 に記載された方法。

【請求項 4】 前記クリティカルな領域を識別するステップは、更に、複数のクリティカルな領域を識別することを含み、前記クリティカルな領域の前記特徴的なピッチを求めることは：識別した各クリティカル領域のピッチを比較することと；前記識別した各クリティカル領域のピッチがほぼ等しい場合、前記クリティカル領域の前記特徴的なピッチを、前記識別した領域のうち 1 つの前記特徴的なピッチに等しいと判定することと；を含む請求項 3 に記載された方法。

【請求項 5】 更に、焦点深度、ライン端部、画像ログ傾斜 (ILS)、画像傾斜 (IS)、および収差感度から成る群から選択した、選択された最適化測定基準に基づいて、前記照明装置形状の領域に重み付けを行うことを含む請求項 1 から 4 までのいずれか 1 項に記載された方法。

【請求項 6】 複数のクリティカル領域を識別するステップと；前記識別したクリティカル領域の各々のピッチを求めるステップと；前記相互透過係数関数から最適化照明形状を算出し、各クリティカル領域ごとに回折オーダーの結像に対する関連性に基づいてオーダーに重み付けを行うステップと；をさらに備える請求項 1 または 2 に記載された方法。

【請求項 7】 光近接補正技法によって前記マスク・パターンにおける異なるピッチの合計数を減らすことで、前記選択したパターンを変更するステップをさらに備える、請求項 1 から 6 までのいずれか 1 項に記載された方法。

【請求項 8】 前記光近接補正技法によって前記選択したパターンを変更するステップは、更に、前記選択した

マスク・パターンにサブレゾリューションのフィーチャを追加することを含む請求項 7 に記載された方法。

【請求項 9】 前記選択したパターンを変更するステップおよび最適化照明形状を算出するステップを繰り返す請求項 7 に記載された方法。

【請求項 10】 照明プロファイルを最適化するためのコンピュータ・プログラムであって、コンピュータ・システム上で実行された場合、請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 項の方法の前記ステップを実行するように前記コンピュータ・システムに命令することを意味するプログラム・コードを備えるコンピュータ・プログラム。

【請求項 11】 デバイス製造方法であって：

(a) 放射感知物質の層によって少なくとも部分的に被覆された基板を供給するステップと；

(b) 照明システムを用いて放射の投影ビームを供給するステップと；

(c) パターンニング手段を用いて前記投影ビームの断面にパターンを与えるステップと；

(d) 前記放射感知物質層の対象部分上に前記パターンニングした放射ビームを投影するステップと；

を備え、請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 項による方法を用いて、ステップ (d) の前に、ステップ (b) において生成した前記投影ビームにおける断面強度分布を、ステップ (c) において用いる前記パターンに適合させるデバイス製造方法。

【請求項 12】 リソグラフィ投影装置であって：放射の投影ビームを供給するための照明システムと；パターンニング手段を支持するための支持構造であって、前記パターンニング手段が所望のパターンに従って前記投影ビームをパターンニングするように機能する、支持構造と；基板を保持するための基板テーブルと；前記基板の対象部分上に前記パターンニングしたビームを投影するための投影システムと；を備え、前記装置は、更に：前記照明装置および前記パターンニング手段の相互透過係数関数を規定し、前記パターンニング手段によって生成した前記パターンに基づいて回折オーダーの結像に対する相対的な関連性を求め、前記相互透過係数関数から最適化した照明形状を算出し、前記回折オーダーの結像に対する前記相対的な関連性に基づいて前記照明形状の領域に重み付けを行う、算出手段と；前記算出手段によって算出した前記照明形状に従って、前記照明システムから射出する前記投影ビームにおける断面強度分布を選択するための選択手段と；を備えるリソグラフィ投影装置。

【請求項 13】 選択したマスク設計を最適化する方法であって：前記選択したマスク設計のクリティカル・フィーチャを識別することと；前記クリティカル・フィーチャの回折オーダーに基づいて最適化した照明プロファイルを求めることと；前記選択したマスク・フィーチャに存在するピッチ数を減らすように選択した光近接補正技法を用いることによって前記選択したマスク設計を

更することと；を備える選択したマスク設計を最適化する方法。

【請求項 14】 前記光近接補正は、更に、前記選択したマスク設計の空間幅の連続確率密度関数を変更するように選択されたサブレゾリューションのフィーチャを追加して、前記変更した確率密度関数が打ち切りを多く有するようにすることを含む請求項 11 に記載された方法。

【請求項 15】 前記最適化した照明プロファイルを求めるステップは、請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 項の方法の前記ステップを備える請求項 13 または 14 に記載された方法。

【請求項 16】 選択したマスク設計を最適化するためのコンピュータ・プログラムであって、コンピュータ上で実行された場合、請求項 13 ないし 15 のいずれか 1 項の方法を実行するように前記コンピュータに命令することを意味するプログラム・コードを備えるコンピュータ・プログラム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、一般に、マイクロリソグラフィ映像法のための方法および装置に関する。更に特定すれば、本発明は、結像している特定のパターンに従って照明の形状を最適化するための装置および方法に関する。

【0002】

【従来の技術】集積回路および、プログラム可能ゲート・アレイ等の他の微細なフィーチャの製品の製造において、現在、光リソグラフィが用いられている。最も一般的な説明では、リソグラフィ装置は、放射の投影ビームを供給する照明システムと、バタニング手段を保持する支持構造と、基板を支持する基板テーブルと、バタニングしたビームを基板の対象部分上に結像するための投影システム（レンズ）とを含む。

【0003】バタニング手段という用語は、基板の対象部分に生成されるパターンに対応して、バタニングした断面を入来する放射ビームに与えるために使用可能な装置および構造を指すものとして広く解釈するものとする。また、この文脈において、「光弁」という用語も用いられている。一般に、パターンは、集積回路または他の素子等、対象部分に生成している素子内の特定の機能層に対応する。

【0004】かかる機構の一例はマスクであり、これは、通常、（可動）マスク・テーブルによって保持される。マスクの概念はリソグラフィにおいて周知であり、これは、2 値、交番移相、減衰移相、および様々なハイブリッド・マスク・タイプ等のマスク・タイプを含む。かかるマスクを投影ビーム内に配置すると、マスクに入射する放射は、マスク上のパターンに従って、選択的に透過（透過型マスクの場合）または反射（反射型マスクの場合）する。マスク・テーブルは、入射する投影ビ

ム内の所望の位置にマスクを確実に保持することができ、更に、所望の場合にはビームに対してマスクを動かすことも確実に可能となる。

【0005】かかる機構の別の例は、粘弾性制御層および反射面を含むマトリクス・アドレス可能面である。かかる装置の背後にある基本的な原理は、（例えば）反射面のアドレスされた領域が入射光を回折光として反射する一方、アドレスされていない領域が入射光を非回折光として反射することである。適切なフィルタを用いて、反射ビームから前記非回折光を除去し、回折光のみを残すことができる。このようにして、マトリクス・アドレス可能面のアドレッシング・パターンに従って、ビームをバタニングする。プログラム可能ミラー・アレイの代替的な実施形態では、マトリクスに配置した小さなミラーを用いる。適切な局所電界を印加することで、または圧電作動手段を用いることで、各ミラーは、軸を中心にそれぞれ傾けることができる。この場合も、ミラーはマトリクス・アドレス可能であり、アドレスされたミラーが、アドレスされていないミラーとは異なる方向に入来放射ビームを反射させるようになっている。このようにして、マトリクス・アドレス可能ミラーのアドレッシング・パターンに従って、反射ビームをバタニングする。必要なマトリクス・アドレッシングは、適切な電子手段を用いて行うことができる。上述の状況の双方において、バタニング手段は、1 つ以上のプログラム可能ミラー・アレイから成るものとして行うことができる。ここで参照したミラー・アレイに関する更に詳しい情報は、例えば、米国特許第 5,296,891 号および第 5,523,193 号、および PCT 特許出願 WO 98/38597 号および WO 98/33096 号から得ることができる。これらは、引用により本願にも含まれるものとする。プログラム可能ミラー・アレイの場合、前記支持構造は、フレームまたはテーブルとして具現化し、例えば、必要に応じて固定または可動とすることができる。

【0006】別の例は、プログラム可能 LCD アレイである。この場合、支持構造はやはり、例えばフレームまたはテーブルとすることができる。かかる構造の一例は、米国特許第 5,229,872 号に与えられている。これも引用により本願にも含まれるものとする。

【0007】簡略化のために、この文書の以降の部分では、いくつかの箇所で、マスクを伴う例を特定して扱うことがある。しかしながら、かかる例で論じる一般的な原理は、上述のバタニング手段の更に広い文脈で理解するものとする。

【0008】投影システムという用語は、様々なタイプの投影システムを包含する。素人の理解では、「レンズ」とは通常、屈折光学系を意味するが、ここでは、この用語は、例えばカトプトリック系およびカタディオプトリック系を含むように広義で用いる。また、照明シス

テムは、投影ビームを方向付け、整形し、または制御するためにこれらの原理のいずれかに従って動作する素子を含む場合があり、以下では、かかる素子のことも、まとめてまたは単独で「レンズ」と呼ぶことがある。

【0009】加えて、「ウエハ・テーブル」という用語は、画像を受ける基板がシリコン・ウエハであることを暗に示すことなく用いることができ、リソグラフィ装置によって処理されるあらゆる基板を支持するのに適切なステージを示すことができる。

【0010】リソグラフィ投影装置は、例えば、集積回路（IC）の製造において用いることができる。かかる場合、パターンニング手段は、ICの個々の層に対応した回路パターンを発生することができ、このパターンを、放射感知物質（レジスト）の層によって被覆されている基板（シリコン・ウエハ）上の対象の部分（1つ以上のダイから成る）上に結像することができる。一般に、単一のウエハは、投影システムによって一度に1つずつ連続的に照射された隣接する対象部分から成るネットワークを含む。マスク・テーブル上のマスクによるパターンニングを用いた現在の装置では、2つの異なるタイプの機械を区別することができる。一方のタイプのリソグラフィ投影装置では、各対象部分を照射する際に、一度でマスク・パターン全体を対象部分上に露出する。かかる装置は、一般にウエハ・ステッパと呼ばれる。一般にステップ・アンド・スキャン装置と呼ばれる他方の装置では、各対象部分を照射する際に、投影ビーム下のマスク・パターンを所与の基準方向（「走査」方向）に徐々に走査し、これに同期して、この方向に対して平行または非平行に基板テーブルを走査する。一般に、投影システムはある倍率M（一般に <1 ）を有するので、基板テーブルを走査する速度Vは、倍率Mに、マスク・テーブルを走査する速度を掛けたものである。ここで述べるリソグラフィ装置に関する更に詳しい情報は、例えば、米国特許第6,046,792号から得ることができる。この特許は、引用により本願にも含まれるものとする。

【0011】リソグラフィ投影装置を用いた製造プロセスでは、放射感知物質（レジスト）の層によって少なくとも部分的に被覆された基板の上に、（例えばマスク内の）パターンを結像する。この結像ステップに先立って、基板に対して、ブライミング、レジスト被覆、およびソフトベーク等の様々な手順を施す場合がある。露光後、基板に対し、露光後ベーク（PEB）、現像、ハードベーク、および結像したフィーチャの測定／検査等の他の手順を施す場合がある。この手順の配列は、例えばICのような素子の個々の層をパターンニングするための基礎として用いられる。かかるパターンニングされた層は、次いで、エッチング、イオン注入（ドーピング）、メタライゼーション、酸化、化学機械的研磨等の様々なプロセスを経る場合がある。これらは全て、個々の層を完成させるためのものである。いくつかの層が必要であ

る場合には、手順全体またはその変形を、新たな各層ごとに繰り返す必要がある。最終的に、基板（ウエハ）上には、素子のアレイが存在することになる。これらの素子は、次いで、ダイシングまたはのこ引き等の技法によって互いに切り離され、そこから個々の素子を、ピン等に接続されたキャリア上に搭載することができる。かかるプロセスに関する更に詳細な情報は、例えば、Peter van Zant, McGraw Hill Publishing Co. 1997年、ISBN 0-07-067250-4の書籍「Microchip Fabrication: A Practical Guide to Semiconductor Processing（マイクロチップの製造：半導体処理のための実用的な手引き）」第3版から得ることができる。この文献は引用により本願にも含まれるものとする。

【0012】簡略化のために、投影システムを、以降、「レンズ」と呼ぶ場合がある。しかしながら、この用語は、例えば屈折光学部品、反射光学部品、および反射屈折光学系を含む様々なタイプの投影システムを包含するものとして広く解釈するものとする。また、放射システムは、放射の投影ビームを方向付け、整形し、または制御するためにこれらの設計タイプのいずれかに従って動作する構成要素を含むことができ、以下では、かかる構成要素のことを、まとめてまたは単独で「レンズ」と呼ぶ場合がある。更に、リソグラフィ装置は、2つ以上の基板テーブル（および／または2つ以上のマスク・テーブル）を有するタイプのものである場合がある。かかる「多数ステージ」の装置では、平行な追加のテーブルを用いる場合があり、または、1つ以上のテーブル上で準備ステップを実行しながら、1つ以上の他のテーブルを露光のために用いることも可能である。2ステージのリソグラフィ装置は、例えば、米国特許第5,969,441号およびWO98/40791号に記載されている。これらは引用により本願にも含まれるものとする。

【0013】照明システムが、従来のものから環状、四重極、および更に複雑な照明の形状を生成するように発展していくにつれて、現在、制御パラメータの数はいっそう多くなっている。従来の照明パターンでは、光軸を含む円形領域を照明し、このパターンに加える唯一の調整は、外半径（ σ_r ）を変更することである。環状の照明は、照明される輪を規定するために、内半径（ σ_i ）を規定する必要がある。多極のパターンでは、制御可能なパラメータ数が増え続ける。例えば、四重極の照明形状では、2つの半径の他に、極の角度 α が、選択した内半径と外半径との間の各極によって定められる角度を規定する。

【0014】同時に、マスク技術も進展している。2値強度マスクは、移相マスクおよび他の高度化したマスクによって取って代わられている。2値マスクは、単に、

所与の点において結像放射を送出、反射、または阻止するが、移相マスクは、一部の放射を減衰させたり、移相を行った後に光を送出もしくは反射させたり、またはその双方を行ったりすることができる。移相マスクは、結像放射の波長またはこれより小さいオーダーのフィーチャを結像するために用いられている。なぜなら、これらの解像度における回折効果は、様々な問題の中でも特に、不十分なコントラストおよびライン端部のエラーを引き起こす恐れがあるからである。

【0015】様々なタイプの照明形状を用いて、解像度、焦点深度、コントラスト、およびその他の印刷画像の特徴を改善することができる。しかしながら、各照明タイプは、何らかのトレードオフを伴う。例えば、コントラストの改善は、焦点深度を犠牲にして得ることができる。各タイプのマスクは、結像されるパターンにも依存する性能を有する。

【0016】従来、ウェハ上に所与のパターンを結像する最適な照明モードを選択するために、一連のテスト・ウェハを行き当たりばったりで露光し比較していた。上記のように、最近の照明システムでは、操作可能な変数の数はますます増えている。変数設定の様々な並び替えが増大するにつれて、試行錯誤による照明形状の最適化のコストが極めて大きくなり、照明形状を選択する定量的な方法が必要とされている。

【0017】先に確認した必要性およびその他に対処するために、本発明は、選択したパターンニング手段のパターンのための照明プロファイルを最適化する方法を提供する。この方法は：照明装置および選択したパターンニング手段のパターンを含む光学システムのための相互透過係数関数を規定するステップと；選択したパターンに基づいて回折オーダーの結像に対する相対的な関連性を求めるステップと；相互透過係数関数から最適化した照明形状を算出し、回折オーダーの結像に対する相対的な関連性に基づいて照明形状の領域に重み付けを行うステップと；を備える。

【0018】本発明の別の態様によれば、デバイス製造方法が提供される。この方法は：

(a) 放射感知物質の層によって少なくとも部分的に被覆された基板を供給するステップと；

(b) 照明システムを用いて放射の投影ビームを供給するステップと；

(c) パターンニング手段を用いて投影ビームの断面にパターンを与えるステップと；

(d) 放射感知物質層の対象部分上にパターンニングした放射ビームを投影するステップと；

を備え、前述の方法を用いて、ステップ(d)の前に、ステップ(b)において生成した投影ビームにおける断面強度分布を、ステップ(c)において用いるパターンに適合させる。

【0019】本発明の別の態様によれば、リソグラフィ

投影装置が提供される。この方法は：放射の投影ビームを供給するための照明システムと；パターンニング手段を支持するための支持構造であって、このパターンニング手段が所望のパターンに従って投影ビームをパターンニングするように機能する、支持構造と；基板を保持するための基板テーブルと；基板の対象部分上にパターンニングしたビームを投影するための投影システムと；を備え、この装置は、更に：照明装置および所望のパターンの相互透過係数関数を規定し、パターンニング手段によって生成したパターンに基づいて回折オーダーの結像に対する相対的な関連性を求め、相互透過係数関数から最適化した照明形状を算出し、回折オーダーの結像に対する相対的な関連性に基づいて照明形状の領域に重み付けを行う、算出手段と；算出手段によって算出した照明形状に従って、照明システムから射出する投影ビームにおける断面強度分布を選択するための選択手段と；を備える。

【0020】本発明の更に別の態様によれば、選択したマスク設計を最適化する方法が提供される。この方法は：選択したマスク設計のクリティカル・フィーチャを識別すること；クリティカル・フィーチャの回折オーダーに基づいて最適化した照明プロファイルを求めること；および選択したマスク・フィーチャに存在するピッチ数を減らすように選択した光近接補正技法を用いることによって選択したマスク設計を変更すること；を備える。

【0021】本発明は、更に、上述の方法を実行するためのコンピュータ・プログラムを提供する。

【0022】この明細書において、本発明による装置をICの製造に用いることに特に言及することができるが、かかる装置は多くの他の可能な用途を有することは明示的に理解されよう。例えば、これは、集積光学システム、磁気ドメイン・メモリ用の誘導および検出パターン、液晶表示パネル、薄膜磁気ヘッド等の製造に用いることができる。かかる代替的な用途の状況においては、この文書における「レチクル」、「ウェハ」、または「ダイ」という用語のいかなる使用も、より一般的な用語「マスク」、「基板」、および「対象位置」によってそれぞれ置換されるものとして見なされることは、当業者には認められよう。

【0023】本発明について、例示的な実施形態および添付の図面を参照して、以下で更に説明する。

【0024】

【発明の実施の形態】本発明は、照明源およびパターンの詳細について考慮して、最初に、(例えばマスクから)基板上へのパターンの結像を数学的にモデリングすることを含む。

【0025】有限照明源について空中像を算出するためには、主に2つの方法がある。これらの方法は、アッペの公式化およびホブキンスの公式化である。アッペの公式化では、照明形状における各点源が、パターン上に入

射する平面波を生成し、これらの点源の各々がウエハ上に結像される。点源は空間的に非干渉性であるので、ウエハにおける合計強度は、これらの点源の各々によって生成される強度の和である。従って、アッペの公式化では、照明形状での積分は、パターンでの積分の後に行う。

【0026】ホブキンスの公式化では、積分の順序を変える。すなわち、源での積分を最初に行う。ホブキンスの公式化では、4次元相互透過係数(TCC)を規定し、TCCの逆フーリエ変換が画像の強度となる。TCCの導出については、例えば、BornおよびWolfのPrinciples of Optics(光学の原理)、第6版、528ないし532ページに説明されている。これは、引用により本願にも含まれるものとする。

【0027】TCCは、照明ひとみで乗算した投影ひとみの自己相関である。図1に、3つの重複する円の集合としてTCCを示す。左から右に説明すると、第1の円は、照明ひとみ $J_s(\alpha, \beta)$ を表し、ここで α および β は照明形状の座標である。後の計算のために、 J_s の半径は、例えば、結像に用いるリソグラフィ装置に可能な最大の外半径 σ_s に設定することができる。また、実現性の研究を行うため、および更に大きな σ_s の利点を明らかにするために、 σ_s を1.0以上に設定すること

*も可能である。

【0028】中央の円は、 $(-m\lambda/P_s NA, -n\lambda/P_s NA)$ を中心とする投影ひとみ $K(\alpha, \beta)$ を表す。座標系は、 λ/NA の因数で正規化されているので、 K の半径は1.0である。右側の円は、同様に投影ひとみを表すが、これは、 $(p\lambda/P_s NA, q\lambda/P_s NA)$ を中心としている。これらの最後の2つの式では、 m 、 n 、 p 、および q は別個の回折オーダーに相当し、TCCが上述のような4次元(4-D)の式であることが明らかになる。 x 方向の回折オーダーは m および p によって表され、 y 方向の回折オーダーは n および q によって表される。この説明のために x および y 座標を用いるが、以下の式で、座標系を適切に変更して代替的な座標系を使用可能であることは、当業者には理解されよう。

【0029】4-Dの別個の点(m 、 n 、 p 、 q)についてのTCCは、3つの全ての円が重複している陰影を付けた領域の積分である。構造は周期的であると想定されているので、パターンのフーリエ変換は離散的であり、TCCは離散的である。連続的なパターン画像では、隣接するフィーチャが対象パターンのフーリエ変換に影響を及ぼさなくなるまで、ピッチを長くすることができる。図1のTCCは、数学的に、式1で書き表される。

$$\iint_{|\alpha|, |\beta| \leq \sigma_s} J_s(\alpha, \beta) K\left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_s NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_s NA}\right) K^*\left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_s NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_s NA}\right) d\alpha d\beta \quad \text{式(1)}$$

【0030】TCCは、回折オーダー相互係数(DOCC)を規定することで、パターンの効果を含むように拡張することができる。式2にDOCCを規定する。これ※30

※は、TCCにパターンのフーリエ変換係数を乗算することによって得られる。

$$DOCC(m, n, p, q) = T(m, n) T^*(-p, -q) TCC(m, n, p, q) \quad \text{式(2)}$$

【0031】更に、ウエハにおける放射強度は、式3に示すように、DOCCの逆フーリエ変換によって算出する★

★ることができる。

$$I(x, y) = \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{i\pi \left[\frac{2x}{\lambda} (m+p) \right]} e^{i\pi \left[\frac{2y}{\lambda} (n+q) \right]} DOCC(m, n, p, q) \quad \text{式(3)}$$

【0032】投影光学系は、部分的に低域フィルタとして作用し、これによって回折オーダーが減少するので、算出した画像強度において重要な回折オーダーは小数のみである。結果として、TCCは帯域限定関数である。必要な最大の x および y のオーダーを、それぞれ、式4および5に従って算出することができる。各々の場合において、負および正の双方のオーダーが必要である。例えば、 m は負の m_{\dots} から正の m_{\dots} までに及ぶ($-m$

$\dots \leq m \leq +m_{\dots}$)。負および正の双方のオーダーが必要であるので、TCCの大きさは、 $2m_{\dots} + 1$ 掛ける $2n_{\dots} + 1$ 掛ける $2p_{\dots} + 1$ 掛ける $2q_{\dots} + 1$ である。しかしながら、幸い、TCCは帯域が限定されているので、全てのパターン回折オーダーを計算する必要はない。TCCにおいてと同様、 x 方向ではパターン回折オーダー $-m_{\dots} \leq m \leq +m_{\dots}$ のみ、 y 方向においてはオーダー $-n_{\dots} \leq n \leq +n_{\dots}$ のみが必要である。

$$f_{x,max} = m_{max} = p_{max} = \text{floor} \left[\frac{P_x NA (1 + \sigma_o)}{\lambda} \right]$$

式(4)

$$f_{y,max} = n_{max} = q_{max} = \text{floor} \left[\frac{P_y NA (1 + \sigma_o)}{\lambda} \right]$$

式(5)

【0033】式1および2を式3に代入すると、ウェハ 10* 結像に最も影響を与える照明ひとみの部分を求めることにおける放射強度についての式6が得られる。式7に示 ができる。式6 および7の各々は2行に及ぶことを注記すように、積分の順序を変えることで、すなわち、ホブ しておく。
キンスの公式化でなくアッペの公式化を用いることで、*

$$I(x, y) = \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} T(m, n) T^*(-p, -q) \quad \text{式(6)}$$

$$\cdot \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) d\alpha d\beta$$

$$I(x, y) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} d\alpha d\beta \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} \quad \text{式(7)}$$

$$\cdot J_s(\alpha, \beta) T(m, n) T^*(-p, -q) K \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right)$$

【0034】 α および β は照明ひとみの座標を表すの ※るかを示し、式8で書き表される。式8から、これに逆で、新たな関数 J_{opt} を規定することができる。新たな 30 フーリエ係数 (e^{ikx}) を乗算し、式9に示すように6関数 J_{opt} は、所与の回折オーダー (m, n, p, q) 個の全ての変数 ($m, n, p, q, \alpha, \beta$) を合計するに対して照明形状のどの部分 (α, β) が用いられてい※ ことで、画像強度を算出することができる。

$$J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = J_s(\alpha, \beta) T(m, n) T^*(-p, -q) K \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \quad \text{式(8)}$$

$$I(x, y) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} d\alpha d\beta \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

式(9)

【0035】明らかになるであろうが、 J_{opt} は6次元の関数であり、従って、これを照明形状に適用することは難しい。照明形状のどの部分が画像形成にとって重要であるかを最良に求めるためには、6個の変数のうちいくつかを除去することが望ましい。

【0036】 $m+p$ および $n+q$ について逆変換を取ることで、空中像強度 $I(x, y)$ を求める。 $m+p=n$ 50

$+q=0$ である場合、空中像強度は変調されていない。照明最適化の目標の1つは、変調に及ぼす影響がほとんど無いか全く無い照明形状の部分を除きすることなので、 $m+p=n+q=0$ となる照明形状の部分を除きすることができる。これらの部分を除き、画像形成にとって重要な照明形状の部分をもっと視覚化するために、変数の変換によって、6次元の J_{opt} 関数 (4 回折オーダー

一)の変数のうち2つを除去し、それを4次元関数(2
回折オーダー)に変換する。この4次元関数を J_{opt-2D} *
 $\eta = m + p \Rightarrow p = \eta - m$

$$\xi = n + q \Rightarrow q = \xi - n$$

*と呼ぶ。式10および11を1(x, y)についての式
9に代入することで、式12を得ることができる。

式(10)

式(11)

$$I(x, y) = \iint_{\alpha^2 + \beta^2 \leq \sigma} d\alpha d\beta \sum_{\eta=-2f_{x,max}}^{+2f_{x,max}} \sum_{\xi=-2f_{y,max}}^{+2f_{y,max}} e^{i\left[\frac{2\pi}{P_x}\eta\right]} e^{i\left[\frac{2\pi}{P_y}\xi\right]} \underbrace{\sum_{m=-f_{x,max}}^{+f_{x,max}} \sum_{n=-f_{y,max}}^{+f_{y,max}} J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, \eta - m, \xi - n)}_{J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi)} \quad \text{式(12)}$$

【0037】式12では、 J_{opt-2D} は、式10および1
1に従って変数を変換した後、mおよびnについてのJ
の和と見ることができる。更に、式8を式12に代
※入することで、 J_{opt-2D} を式13におけるように表すこ
とができ、強度I(x, y)を、式14におけるように
 J_{opt-2D} の関数として書くことができる。

$$J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) = J_s(\alpha, \beta) \sum_{m=-f_{x,max}}^{+f_{x,max}} \sum_{n=-f_{y,max}}^{+f_{y,max}} T(m, n) T^*[-(\eta - m), -(\xi - n)] \quad \text{式(13)}$$

$$\cdot K \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K^* \left(\alpha - (\eta - m) \frac{\lambda}{P_x NA}, \beta - (\xi - n) \frac{\lambda}{P_y NA} \right)$$

$$I(x, y) = \iint_{\alpha^2 + \beta^2 \leq \sigma} d\alpha d\beta \sum_{\eta=-2f_{x,max}}^{+2f_{x,max}} \sum_{\xi=-2f_{y,max}}^{+2f_{y,max}} e^{i\left[\frac{2\pi}{P_x}\eta\right]} e^{i\left[\frac{2\pi}{P_y}\xi\right]} J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) \quad \text{式(14)}$$

【0038】関数 J_{opt-2D} は、値を求めると、各回折オ
ーダーごとに重要な照明形状の部分を示す。J

J_{opt-2D} は、各回折オーダーT(m, n)によって重み付
けられるので、大きい回折オーダーは、空中像に及ぼす
影響が大きくなる。

【0039】特定のパターンについて最適な照明形状の
ための開始点を、 J_{opt} と示すことができ、これは、式
15に示すように、 η および ξ について J_{opt-2D} を合計
し、 $J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta=0, \xi=0)$ を減算するこ
とで求められる。式15では、 $\eta=0$ および $\xi=0$ の場
合、空中像は変調されておらず、 $J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta \star$

★=0, $\xi=0$)成分は、ゼロのオーダーまたはDC光を
表す。結像に寄与しない照明内の点によって、DC光の
全量は増大する。増大したDC光は変調を引き起こさな
いので、これは大して有益ではなく、更に、結果として
焦点深度が浅くなる恐れがある。

【0040】このため、 J_{opt} による照明形状はDC光
の量を最小限に抑え、結果としてプロセス・ウインドウ
が改善する。式 J_{opt} を用いて、照明装置のどの部分が
画像形成にとって重要性が高いか(または重要性が低い
か)を示すことができる。

$$J_{tot}(\alpha, \beta) = \left[\sum_{\eta=-2f_{x,max}}^{+2f_{x,max}} \sum_{\xi=-2f_{y,max}}^{+2f_{y,max}} J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) \right] - J_{opt-2D}(\alpha, \beta, 0, 0) \quad \text{式(15)}$$

【0041】照明形状およびパターンは結合されるの
で、光近接補正(OPC)を変更すると回折オーダーに
影響を与え、従って J_{opt} に影響を与える。結果とし
て、当業者には理解されようが、OPCエンジンおよび
照明エンジンによる処理の繰り返しを用いて、初期照明
形状 J_{opt} およびパターンに対する変更を何度か行わな
ければならない。更に、パターンおよび照明形状は、特
定の結像基準(焦点深度(DOF)、ライン端部(EO
L)、収差に対する感度等)を最適化するようにも調節
する必要があり、これは最適化ソフトウェアによって行

うことができる。しかしながら、最適な照明形状に最大
の影響を与えるのは、OPCフィーチャではなく、全体
としてのパターンであるので、 J_{opt} は最適な初期照明
形状であり、照明形状およびパターンに関する繰り返
しの最適化のために最も速く収束することになる。

【0042】初期照明形状 J_{opt} は、0ないし1の範囲
の連続的な強度値を有するグレー・スケール照明形状に
よって表すことができる。回折光学素子(DOE)によ
って、またはディザリングを行ったクロムめっきを施し
た水晶板を用いることで、かかるグレー・スケール照明

形状を生成することができる。グレー・スケール照明形状が可能でないか、または好ましくない場合は、グレー・スケールに閾値を適用することで、照明装置プロファイルを0および1のみに強制することができる。この場合、閾値を超える値は1に切り上げて、閾値未満の値は0に切り捨てる。任意の閾値を適用することができ、または、プロセス・ウインドウをシミュレートすることで、もしくは試運転を繰り返すことで、最適な閾値を見出すことができる。

【0043】例1：先に概説した $J_{\eta, \xi}$ を算出するための技法を、れんが壁分離パターンに適用した。150 nmのパターンを130 nmおよび110 nm設計基準に縮小し、開口数(NA)が0.8のステップ・アンド・スキャン・リソグラフィ・システムにより結像した。図2に、130 nm設計基準の分離パターンを示す。

【0044】図3に、このマスク・フィーチャの回折オーダーの大きさを示す。図3では、最大のオーダーは、(0, 0)オーダーまたはDC背景光である。結像に最も寄与したオーダーは、 $(\pm 2, 0)$ オーダーであり、れんが壁パターンにおける縦方向のれんがを表す。他の重要なオーダーは $(\pm 1, \pm 1)$ であり、クリアな領域を表し、分離パターンの端部を規定する。また、これより高いオーダーは、各ラインの端部等の2次元構造を規定するのに役立つ。回折パターンが一定でないので、オーダーによってDOCCにおける重み付け係数が変化し、これは、マスク・パターンが照明の方法に影響を与えることを示唆している。

【0045】図3における回折オーダー係数 $T(m, n)$ を式13に代入して、 $J_{\eta, \xi}$ を算出することができる。これを図4に示す。図4からわかるように、 $J_{\eta, \xi}$ に対する最大の寄与は、 $(\eta = 0, \xi = 0)$ オーダーである。(0, 0)オーダーは、結像に寄与せず、DOFを浅くする。式15が示すように、この(0, 0)オーダーを、合計照明 $J_{\eta, \xi}$ から減算することができる。(0, 0)オーダーを考慮しないと、最大の寄与は $(\eta = \pm 2, \xi = 0)$ 回折オーダーであり、これは、x方向に沿った分離ラインの形成を表す。大きく、かつ分離ラインの端部を規定する別の成分は、 $(\eta = \pm 1, \xi = \pm 1)$ 回折オーダーである。(0, ± 2)回折オーダーはやや小さいが、これより大きいオーダーは、レンズの $\eta = 0$ および $\xi = \pm 2$ の領域において結合する。また、これらの領域は、ライン端部を規定するのに役立つ。DOCCの手法は、画像形成を改善するためにどのように照明ひとみをサンプリングするかを示し、れんが壁分離パターンの結像を理解するために有効な方法である。

【0046】式15を用いて、130 nm設計基準のれんが壁パターンの照明ひとみを算出することができる。これを図5に示す。図5は、画像形成にとって最も重要な領域はx軸に沿った照明形状の外側部分であることを

示している。これらの外側部分は、楕円ダイボールを形成する。これらの楕円ダイボール要素に加えて、照明ひとみの中心は、画像形成に大きく寄与する。上記のように、照明ひとみは、グレー・スケールまたは2値照明プロフィールで実施することができる。

【0047】用いる装置に応じて、グレー・スケール照明が可能である場合がある。グレー・スケール照明とは、制御可能な照明強度を意味し、照明形状の少なくとも所与の部分について、0から1までの正規化レベルを選択することができる。例えば、かかる照明強度の制御は、照明システムにおける回折光学素子(DOE)を用いて行うことができる。この場合、例えば、照明形状は、図5に示すように実施することができる。しかしながら、理論上算出され図5に見られる局所スパイクの一部は、上述のように、投影光学系の結果として照明情報を低域フィルタで濾波した後に除去される。従って、照明形状を設計する場合、濾波されるスパイクは無視するものとする。

【0048】2値照明形状を用いる場合、すなわち、照明装置の強度に2値のみ(0または1)が可能である場合、照明形状の各点に0または1の値を割り当てるための基礎として、閾値を選択しなければならない。例えば、0.8の閾値を選択した場合、0.8を超える照明装置の強度値は1に切り上げられ、0.8未満の値は0に切り捨てられる。所望の場合は、他の閾値を適用することも可能である。

【0049】例2：2値の手法にグレー・スケールを用いて、0.88の最大外半径 σ を想定して、同じれんが壁分離パターンについて2値照明形状を設計し、図6に示す。

【0050】次いで、図6の最適化された照明形状の性能を、 $NA = 0.8$ および $\lambda = 248$ nmのステップ・アンド・スキャン・リソグラフィ装置上の2値マスクについてシミュレートし、環状照明のシミュレートした性能と比較した。このシミュレーションでは、開口数が0.7を超えたので、ベクトル(薄膜)結像レジスト・モデルを用いた。このモデルでは、レジストは、屈折率 $n = 1.76 - j0.0116$ を有するタイプの400 nmの厚さであり、 $n = 1.577 - j0.3588$ のポリシリコン物質の上の $n = 1.45 - j0.3$ を有する別のタイプの66 nmの上にある。図7および8に、環状照明($\sigma_{in} = 0.58$ および $\sigma_{out} = 0.88$)ならびに最適化した照明装置($\sigma_{out} = 0.88$)の結果をそれぞれ示す。図7および8の双方において、分離領域の中央における断面の結果およびトップダウンのシミュレーション結果を示す。これらの図では、レジストを介した強度を平均化することによって、空中像閾値からBossungプロットBを算出し、結果として得られた線幅lwを、閾値の強度について、焦点fに対してグラフ化する。この技法は、DOFを厚さのロスとして過

剰予測する傾向があり、レジスト・プロファイルの傾斜は考慮されていない。おそらく、少なくとも厚さのロスを出算するレジスト・モデルが必要であろう。図の各々において、トップダウンの結果は、Bossungプロットで算出したような最適な閾値（最適な照射量）での実線の曲線として描かれている。これらのシミュレートした閾値の画像を、点線の直線で示す実際のマスク・データと比較する。

【0051】図7には、環状照明($\sigma_{in}=0.58$ および $\sigma_{out}=0.88$)を用いた0.8のNAでの2値マスク・フィーチャについて、130nm設計基準のれんが壁分離パターンのシミュレーション結果を示す。この環状設定は、 $-0.4\mu\text{m}$ から $0.0\mu\text{m}$ 焦点まで、約 $0.4\mu\text{m}$ のDOFを有する。レジストのコントラストは、全焦点を通じて低く、低コントラストのレジストによって結像することができる。しかしながら、この低強度のコントラストでは、マスク誤差増大ファクタ(MEEF)が大きく、露出ラチチュード(EL)が小さい。また、図7におけるトップダウンの画像は、ライン端部(EOL)の短縮が約20nmであることを示しているが、これは、130nm設計基準についてわずかにラインを延長して固定することができる。しかしながら、設計基準が縮小し続けると、延長したラインが他のフィーチャと衝突する恐れがあるので、ラインの延長はもはや実行可能でない。従って、照明によってEOLを固定することが望ましい。

【0052】図8では、130nm設計基準のれんが壁分離パターンについてのシミュレーション結果を、0.8のNAで、図6の最適化2値照明形状を用いて、2値マスク・フィーチャについて図示している。最適化照明形状は、 $-0.45\mu\text{m}$ から $+0.15\mu\text{m}$ 焦点まで、約 $0.6\mu\text{m}$ のDOFを有する。図8の断面画像を図7のものと比較すると、最適化した照明形状は、環状の照明に比べて、全焦点を通じてコントラストが大きい。この大きなコントラストは、環状照明に比べて最適化照明形状についてのMEEFが小さく、最適化照明形状のための露出ラチチュードが大きいことを示唆する。この最適化照明形状の別の利点は、環状照明に比べて、ライン端部の性能が改善されていることである。図8のトップダウン画像は、この最適化照明形状が、パターン上のラインを延長することなくEOLを維持可能であることを示し、これは、より大胆な設計基準の縮小のために好都合である。

【0053】例3： 図7および8における2値マスク(BIM)についての結果を、クロムレス・マスク(CLM)についてのシミュレーション結果と比較した。当業者に既知の方法で、ソフトウェア・シミュレーションの実験結果から、クロムレスれんが壁分離パターンを設計した。クロムレス技術は、軸はずれ照明によって得られるDOFの改善から十分な恩恵を受けるように、

(0,0)オーダーの光を必要とする。シミュレーションからの実験結果によって、(0,0)オーダーの光の必要性が裏付けられる。このために、分離層にディザリングを行うか、またはハーフトーンとしなければならない。ハーフトーンのピッチは、ディザリングを行った方向の第1のオーダーが投影ひとみに入らないように選択すれば良い。この例では、 $\lambda/[NA(1+\sigma_{out})]$ 未満のピッチで、垂直方向にラインにディザリングを行った。しかしながら、ディザリングのデューティ・サイクルは、最適なDOFおよびパターン忠実度のために、(0,0)オーダーの光の量を最適化するように調整しなければならない。CLMのためのシミュレーション結果では、ハーフトーン・ピッチは、50%のデューティ・サイクルで155nmであった(77.5nmのクロム・アイランド)。このピッチでは、(0,±1)オーダーが投影ひとみに入ることがほぼ妨げられる。しかしながら、このデューティ・サイクルは、コンピュータ支援設計ツールによってDOFを最大にするように調整しなければならない。

【0054】例4： 130nm設計基準層についてのシミュレーション結果を、155nmハーフトーン・ピッチおよび50%デューティ・サイクルのCLMについて図示した。0.8のNAおよび環状照明($\sigma_{in}=0.58$ および $\sigma_{out}=0.88$)により、 $\lambda=248\text{nm}$ の装置で、CLMを露光した。この環状設定のCLMは、DOFが $0.5\mu\text{m}$ であった($-0.4\mu\text{m}$ 焦点から $+0.1\mu\text{m}$ 焦点)。環状照明のCLMは、環状照明のBIMに比べて、DOFが大きく、全焦点を通じてコントラストが優れていた。これは、CLMの性能がBIMマスクよりも優れていたことを示す。トップダウン・シミュレーションの結果は、CLMによるEOL性能が理論的にはBIMによるEOL性能よりも優れていること、および、CLMはBIMに比べてコンタクト・ホールランディング領域をより十分に規定することもできたことを示した。

【0055】例5： 130nmれんが壁分離パターン分離層についてのシミュレーション結果を、0.8のNAおよび図6に示す最適化楕円ダイボールの $\lambda=248\text{nm}$ の装置について図示した。これらの結果を、155nmハーフトーン・ピッチおよび50%のデューティ・サイクルを有する前の例で用いたCLMレチクルと同一のレチクルを用いてシミュレートした。この最適化照明形状で露光したCLMは、 $0.7\mu\text{m}$ のDOF($-0.5\mu\text{m}$ から $+0.2\mu\text{m}$)を有し、40%の改善であった。Bossungプロットは、同焦点強度が約0.21であることを示していた。加えて、正確な線幅の大きさとするようにレチクルを調整し、更に性能を改善するために、モデルに基づくOPC手法を適用することができた。線幅を補正するには、例えば、バイアスを加えること、およびハーフトーン・デューティ・サイクルの変

更を行えば良い。トップダウン・シミュレーション結果は、CLMがコンタクトのランディング領域を規定することができ、CDの均一性を維持することができることを示していた。この楕円照明形状によって、くびれおよび他の線幅の不一致が低減した。更に、CLMレチクルは、DOFを改善するようにバイアスをかけることができ、この結果、EOL性能が改善するはずである。更に、モデルに基づくOPCは、EOLを更に補正することができるはずである。

【0056】例6： 110nm設計基準の分離層について、図2のマスク・パターンを用いて、式13および15により、最適化照明形状を生成した。照明ひとみのサンプリングを視覚化するために、 J_{\dots} を図9に図示し、 x オーダー($\eta = m + p$)を水平方向に、 y オーダー($\xi = n + q$)を垂直方向に示す。130nm設計基準についての図4と同様に、図11の110nm設計基準に対する最大の寄与は、($\eta = 0, \xi = 0$)オーダーである。この($0, 0$)オーダーの光は、DOFにとって有害であり、式15に示すように、 J_{\dots} において除去される。また、図9は、($\pm 2, 0$)オーダーでなく($\pm 1, \pm 1$)オーダーが、照明形状の最適化に対して最大の寄与となることを示す。これは、 $NA = 0.8$ の248nmの装置では110nm設計基準は積極的すぎるという事実のためであり、この解像度を達成するためには、わずかに高いNAが好ましい。分離線幅を規定するために最も寄与するオーダーは、($\pm 2, 0$)オーダーである。しかしながら、($\pm 2, 0$)オーダーは、照明形状の遠方縁部にあり($0.8 < \sigma < 1.0$)、これは、 σ が1であると、この波長における110nm設計基準の実施を改善可能であることを示している。

【0057】式15および図9の結果を用いて、図10に、110nmれんが壁分離層についての最適化照明形状を示す。図10は、画像形成に最も寄与する照明形状領域が、照明形状の中央の小部分および遠方縁部であることを示している。図11aに、この照明形状の1つの可能な実施態様を図示する。248nm装置を用いて更に積極的な設計基準を印刷し、投影開口数の制限を課すためには、図11bに示すように、 σ を1.0とし、小さいセクタ(σ のリング幅は0.2)を有する照明形状を用いる。

【0058】本発明の実施態様は、クリティカルなセルまたは特定のゲートの選択を含む。次いで、これらのクリティカル・フィーチャを処理して、上述のように J_{\dots} を求める。セクション1では、照明形状はパターンに依存することが示された。従って、クリティカル・フ

ィーチャについてピッチに著しい差が無い場合、全てのクリティカル・フィーチャについて、プロセス・ウインドウを最適化する単一の照明形状を生成することができる。図12に、クリティカル・ゲート g_1, g_2, g_3 およびクリティカル・セル c_1, c_2 を有する回路の1例を示す。これらのタグ付きのクリティカル・フィーチャの回折オーダーを算出することができ、すでに述べた理論を用いることで、最適化照明形状を算出することができる。最適化照明形状を算出した後、プロセス・ウインドウを算出し、他の照明形状によるプロセス・ウインドウと比較することができる。

【0059】照明/パターンの相互作用を最適化する別の方法は、散乱バーによってパターン設計を変更することである。散乱バーは、ASICまたは論理設計についての半連続関数からピッチを打ち切る。散乱バーを配した後、ピッチは少なくなる。これは、シミュレーション・ソフトウェアにおいて、 $0.61\lambda/NA$ のエッジ間分離で散乱バーを配置することで実証することができる。図13では、複数の散乱バーを加えることで図12の設計を変更している。次いで、この変更した設計について、照明形状を最適化することができる。次いで、散乱バーを有する設計について最適化した照明形状のプロセス・ウインドウ性能を、散乱バーを有することなく最適化した照明形状のプロセス・ウインドウと比較することができる。散乱バーを有する設計はピッチを打ち切るので、散乱バーと最適化した軸はずれ照明(OAI)との組み合わせは、最大の可能DOFプロセス・ウインドウを有する。

【0060】照明形状の最適化を実施するための別の概念は、空間幅(SW)の考慮に基づいた散乱バーの配置によるものである。散乱バーは、ルールに基づくOPCによって配置する。このルールは、空間幅によって規定することができる。シミュレーション・ソフトウェアを用いて、散乱バーを有しない場合および散乱バーを有する場合の空間幅の確率密度関数(pdf)を算出することができるはずである。次いで、式16に示すように J_{\dots} を変更することでpdfを考慮して、照明を最適化することができる。垂直のラインおよび水平のラインが無限であると想定すると、回折オーダー $T(m, n)$ を算出することも可能である。式17において、 m および n の関数として回折オーダーを算出する。ここで w は線幅であり、 τ はレチクルの強度透過率、ならびに、 $P_x = SW_x + w$ および $P_y = SW_y + w$ は、それぞれ x および y 方向におけるピッチである。

$$\begin{aligned}
& J_{opt-2D}(\alpha, \beta, \eta, \xi) = \\
& J_s(\alpha, \beta) \sum_{m=-f_{max}}^{f_{max}} \sum_{n=-f_{max}}^{f_{max}} \iint dP_x dP_y p d f(P_x) p d f(P_y) T(m, n) T^*[-(\eta-m), -(\xi-n)] \\
& \cdot K\left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA}\right) K^*\left(\alpha - (\eta-m)\frac{\lambda}{P_x NA}, \beta - (\xi-n)\frac{\lambda}{P_y NA}\right)
\end{aligned}$$

式(16)

【0061】式17は、4つの式の行列であり、提示の 10* および $m \neq 0$ 、 $n \neq 0$ である。
 順に、 $m=n=0$ 、 $m=0$ 、 $n \neq 0$ 、 $m \neq 0$ 、 $n=0$ 、*

$$T(m, n) = \begin{cases} 1 - w \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \left(\frac{1}{P_x} + \frac{1}{P_y}\right) + \frac{w^2}{P_x P_y} \left(1 + \sqrt{\tau}\right)^2 \\ \left[1 - \frac{w}{P_x} \left(1 + \sqrt{\tau}\right)\right] \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \left(\frac{P_y}{\pi n}\right) \sin\left(n \frac{\pi w}{P_y}\right) \\ \left[1 - \frac{w}{P_y} \left(1 + \sqrt{\tau}\right)\right] \left(1 + \sqrt{\tau}\right) \left(\frac{P_x}{\pi m}\right) \sin\left(m \frac{\pi w}{P_x}\right) \\ \left(1 + \sqrt{\tau}\right)^2 \left(\frac{P_x}{\pi m}\right) \sin\left(m \frac{\pi w}{P_x}\right) \left(\frac{P_y}{\pi n}\right) \sin\left(n \frac{\pi w}{P_y}\right) \end{cases}$$

式(17)

【0062】一部のピッチは他のものほど重要でないことが示唆されるため、 $p d f$ によって最適照明形状を算出すると、いくつかの問題が生じる。 $p d f$ において全てのゲートがクリティカルであると思なされる場合、重み付け係数によって $p d f$ を変更しなければならない。この重み付け係数は、 $w f(P_x)$ と呼ぶピッチの関数である。この重み付け係数により、全てのクリティカルなピッチを同一に扱い、 $w f(P_x) \cdot p d f(P_x) = 1$ となるようにしなければならない。式16における $p d f(P_x)$ を $w f(P_x) \cdot p d f(P_x)$ によって置換することで、この重み付け係数を式16に追加するものとする。ピッチの全てがクリティカルである場合、重み付け係数は、最適化を決定するために役立たず、(パターンの)設計を変更することなく最適化照明形状を生成することは難しい。

【0063】この問題に対する1つの解決策は、上述の散乱バーを加えて設計を変更することである。散乱バーは、分離されたフィーチャについてピッチを小さくするのに役立つ。一旦、設計に散乱バーを加えたならば、以前分離したフィーチャは、密集したフィーチャとして作用する傾向がある。このため、散乱バーは、連続的な $p d f$ から更に離散的な $p d f$ までピッチを打ち切る。図14は、散乱バーを適用した場合および適用していない場合の、 y 方向(すなわち「垂直」方向)に配向したフィーチャを有する論理パターンについての一例の $p d f$ である。図14は、 x (水平)軸上に垂直ゲート空間幅(μm)を示す。散乱バーを有しない変更されていない設計Dでは、0.2、0.6、および1.5 μm の空間幅において、 $p d f$ に3つの別個の隆起がある。散乱バ

ーを配置した後、D+SBでは、ピッチ数が減って、空間幅のほとんどが0.2 μm の密集したピッチにあるようになっている。この $p d f$ の変更によって、照明形状を最適化することが可能な確率が高くなる。

【0064】水平(x 軸)および垂直のフィーチャの双方を有する設計についての全体的な照明形状は、水平および垂直の照明形状の和である。垂直フィーチャについて照明形状を σ_{ex} に集中させ、水平フィーチャについて σ_{ey} に集中させる場合、

$$\sqrt{2} \sigma_{ex} \leq 1 \text{ かつ } \sqrt{2} \sigma_{ey} \leq 1$$

であるならば、最適照明形状は、「従来の」四重極照明形状である。その他の場合、このタイプの分析は、結果として、45度回転した四極照明形状となる。

【0065】ここに提示し5照明技法は、収差を考慮するように拡張することができる。収差を含むことで、オペレータは、照明形状のどの部分が収差に結合するかを決定することができる。結合量は、収差に対する画像強度の感度に直接関連する。この結合を理解することで、設計の収差感度を最小限に抑えるように照明形状を変更することができる場合がある。

【0066】スカラ結像についての投影ひとみ $K(\alpha, \beta)$ は、傾斜ファクタ、焦点はずれ、およびセルニク多項式によって表される波面の指数関数を含む。このスカラ結像ひとみを式18に示す。このひとみは、更に、2つの部分に分割することができる。すなわち、非逸脱ひとみ $K_0(\alpha, \beta)$ および逸脱ひとみ(波面の指数関数)であり、これらの2つの部分は式19に示すように共に乗算する。

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{\left[\frac{1 - (\alpha^2 + \beta^2)/M^2}{1 - (\alpha^2 + \beta^2)} \right]^{1/4}}_{\text{obliquity-factor}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \right]}_{\text{defocus}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right]}_{\text{aberrations}} \quad (13)$$

式(18)

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{K_0(\alpha, \beta)}_{\text{unaberrated}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right]}_{\text{aberrations}} \quad (19)$$

式(19)

ここで、

$$K_0(\alpha, \beta) = \underbrace{\left[\frac{1 - (\alpha^2 + \beta^2)/M^2}{1 - (\alpha^2 + \beta^2)} \right]^{1/4}}_{\text{obliquity-factor}} \underbrace{\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2} \right]}_{\text{defocus}} \quad (20)$$

式(20)

$$W(\alpha, \beta) = \sum_{\nu=5}^{37} Z_{\nu} R_{\nu}(\alpha, \beta) \quad (21)$$

式(21)

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \cong 1 + x \quad (22)$$

式(22)

【0067】式22から、波面を線形の近似として書く * 代入することで、式24により、投影ひとみK(α, β) ことができる。これを式23に示す。式23を式22に* β) についての線形近似を算出することができる。

$$\exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) \right] \cong 1 - i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta) = 1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{\nu=5}^{37} Z_{\nu} R_{\nu}(\alpha, \beta) \quad (23)$$

式(23)

$$K(\alpha, \beta) \cong K_0(\alpha, \beta) \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{\nu=5}^{37} Z_{\nu} R_{\nu}(\alpha, \beta) \right] \quad (24)$$

式(24)

【0068】TCCは投影ひとみK(α, β)の関数であるので、式24におけるひとみに対する線形近似は、線形近似によってTCCを表すことが可能であることを示している。これは、式24を式1に代入することで達成される。これによって式25が得られる。再び、2以上のべきの項を無視することで、式25のTCCを式26に示すように簡略化することができる。

【0069】波面W(α, β)は、式21に示すように、ゼルニケ高次項式の和によって示されることが最も

多い。収差の線形理論を用いて、指数e*を、テイラー級数の展開によって表すことができる。テイラー級数の展開は、小さいxについては有効であり、以前の研究によって、Z_νが0.04λ未満の場合、空中像について良好な一致が示されている。式22に、e*についてのテイラー級数の展開を示す。式22では、2以上のべきの項を切り捨てているが、これは、Z_νが0.04未満である場合に有効である(0.04²=0.0016であり、無視することができる)。

$$TCC(m, n, p, q) \equiv \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{n\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha + \frac{n\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) \right] \\ \cdot K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \left[1 + i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \right] d\alpha d\beta$$

式(25)

$$TCC(m, n, p, q) \equiv \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \\ \cdot \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) + i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \right] d\alpha d\beta$$

式(26)

【0070】式27および28の非逸脱TCC、TCC * 9に示すように、TCC₀およびTCC_vの線形関数によ
り(m, n, p, q)、および逸脱TCC、TCC えてTCCを表すことができる。
り(m, n, p, q)をそれぞれ規定することで、式2 *

$$TCC_0(m, n, p, q) = \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) d\alpha d\beta$$

式(27)

$$TCC_v(m, n, p, q) = -i \frac{2\pi}{\lambda} \iint_{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2} < \sigma} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right)$$

式(28)

$$TCC(m, n, p, q) \equiv TCC_0(m, n, p, q) + \sum_{v=5}^{37} Z_v \left[TCC_v(m, n, p, q) + TCC_v^*(-p, -q, -m, -n) \right]$$

式(29)

【0071】式29に示すように線形近似としてTCC ※ についての式8を用い、式18および29に概要を記した
を構築することができるので、J₀₀₀も線形近似として ようなTCCの線形近似についての方法論に従うこと
書くことができる。J₀₀₀に対する線形近似は、J₀₀₀に※ で、式30において求められる。

$$J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \approx J_s(\alpha, \beta) T(m, n) T^*(-p, -q) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right)$$

$$\cdot \left[1 - i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) + i \frac{2\pi}{\lambda} \sum_{v=5}^{37} Z_v R_v \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) \right] d\alpha d\beta$$

式(30)

【0072】次いで、J₀₀₀についての式30を、式3
3に示すように、非逸脱J₀₀₀および逸脱J_{000v}の和に

分割することができる。式31および32に、J₀₀₀お
よびJ_{000v}の定義をそれぞれ示す。

$$J_{opt0}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right)$$

式(31)

$$J_{optv}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = -i \frac{2\pi}{\lambda} J_s(\alpha, \beta) K_0 \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right)$$

式(32)

$$\cdot K_0^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right) R_v \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right)$$

【0073】式32は、特定の収差に結合する照明形状の部分を記述する。結合量は、画像強度に影響を与え、照明に対する収差の感度の理解に役立つ。式31および*

*32を組み合わせることで、 J_{opt} を線形近似として書くことができる。

$$J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \cong J_{opt0}(\alpha, \beta, m, n, p, q) + \sum_{v=5}^{37} Z_v \left[J_{optv}(\alpha, \beta, m, n, p, q) + J_{optv}^*(\alpha, \beta, -p, -q, -m, -n) \right]$$

式(33)

【0074】本発明の別の態様では、重み付け係数を導入して、例えば、焦点深度(DOF)、画像ログ傾斜(ILS)、画像傾斜(IS)、または収差感度を含む特定の測定基準に対する応答を最大化または最小化する※

※ことができる。式34に示すように、これらの重み付け係数を含むように式15の最適な J_{opt} を変更することができる。

$$J_{tot}(\alpha, \beta) = \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q w(\alpha, \beta, m, n, p, q) J_{opt}(\alpha, \beta, m, n, p, q) \quad \text{式(34)}$$

【0075】一般に、フォトリソは、それに入射する光の強度の対数に比例して反応する。強度、従って強度の対数が増大するにつれて、フィーチャは、より高い忠実度でレジスト内に印刷される(すなわち、レジスト★30

★・プロファイルが改善し、プロセス・ウインドウが改善する)。従って、強度の対数変化(ILS)を最大とすることが望ましい。式35に、ILSを定義する。

$$ILS \propto \frac{\partial \ln I}{\partial x} = \frac{1}{I} \frac{\partial I}{\partial x} \quad \text{式(35)}$$

【0076】強度の導関数は強度の逆数よりも変化が速いので、強度の導関数を増大させることで式35は更に増大する。強度は式3から算出可能であり、xに対する強度の導関数は式36において定義される。xに対する

導関数によって、式37に示すように、重み付け関数 w_x が得られる。同様に、式38に示すように、yに対する重み付け関数 w_y を定義することができる。

$$\begin{aligned}\frac{\partial I(x, y)}{\partial x} &= \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q i \frac{2\pi}{P_x} (m+p) e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} DOCC(m, n, p, q) \\ &= \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q w_x(m, p) e^{i \left[\frac{2\pi}{P_x} (m+p) \right]} e^{i \left[\frac{2\pi}{P_y} (n+q) \right]} DOCC(m, n, p, q)\end{aligned}$$

式(36)

$$w_x = i \frac{2\pi}{P_x} (m+p)$$

式(37)

$$w_y = i \frac{2\pi}{P_y} (n+q)$$

式(38)

【0077】パターン・フィーチャおよび強度フィーチャは2次元であるので、傾斜のノルムを用いて、位置に対する強度の変化を示すことができる。式39に、強度傾斜のノルムを定義する。これによって、我々は、式3*

*4における J_{ILS} を算出するための重み付け関数を定義することができる。式40によって、画像ログ傾斜を最大化するための重み付け関数を定義する。

$$\|\nabla I\| \Rightarrow w_{NILS} = \sqrt{|w_x|^2 + |w_y|^2}$$

式(39)

$$w_{ILS}(m, n, p, q) = 2\pi \sqrt{\left(\frac{m+p}{P_x}\right)^2 + \left(\frac{n+q}{P_y}\right)^2}$$

式(40)

【0078】式40は、 $m+p=0$ および $n+q=0$ である場合、重み付け関数が0になることを示す。 $m+p=0$ および $n+q=0$ である場合、これらのオーダーは、画像変調に何ら寄与せず、画像に対するDC寄与を反映する。更に、 $m+p$ および $n+q$ が増大するにつれて、 w_{ILS} が増大する。これは、より高いオーダーの回折オーダー項は、より大きく重み付けされ、ILSに対する寄与が大きくなることを示している。

※【0079】ILSの最大化に加え、ILSが改善されて焦点に対する強度反応が最小限に抑えられると、プロセスの焦点深度が大きくなる。焦点は、ひとみ $K(\alpha, \beta)$ によって説明される。ひとみ $K(\alpha, \beta)$ を式41に示すが、ここで、焦点は z と示している。式41は、2つの項に分割することができる。すなわち、式42に示すように、 z に依存する項(焦点はずれ項)および z から独立している項(非焦点はずれ項)である。

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{\left[\frac{1 - (\alpha^2 + \beta^2)/M^2}{1 - (\alpha^2 + \beta^2)} \right]^{1/4}}_{\text{aberration-factor}} \underbrace{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}\right]}_{\text{defocus}} \underbrace{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} W(\alpha, \beta)\right]}_{\text{aberrations}}$$

式(41)

$$K(\alpha, \beta) = \underbrace{K_{nd}(\alpha, \beta)}_{\text{non-defocused}} \underbrace{\exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}\right]}_{\text{defocus}} = K_{nd}(\alpha, \beta) K_d(\alpha, \beta)$$

式(42)

【0080】 z に対する強度の導関数をゼロに設定することで、焦点 z による強度の変動を最小限に抑えることができる。式42を式1ないし3に代入して、式43に★

★示すように、費用関数 $f(\alpha, \beta, z)$ を定義することができる。これは、 z に依存する強度結像項の費用関数である。

$$f(\alpha, \beta, z) = K_s \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P_x NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P_y NA} \right) K_s^* \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P_x NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P_y NA} \right)$$

式(43)

【0081】一方、費用関数 $f(\alpha, \beta, z)$ は、 $g(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ がゼロに等しい場合、最小

限に抑えられる（以下の式44を参照）。式44では、大きさの項がゼロに等しい場合にのみ、 z に対する導関数がゼロに等しいので、位相項が除去されている。 $g(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ がゼロである場合、所与のオーダー（ m, n, p, q ）についてのひとみの領域（ α, β ）は、焦点に対する感度が最小である。これらは、照明形状を構築するための、ひとみの最も望ましい*

$$g(\alpha, \beta, m, n, p, q) = \frac{\partial}{\partial z} f(\alpha, \beta, z)$$

$$= \left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P, NA} \right)^2 - \left(\beta + \frac{n\lambda}{P, NA} \right)^2} + i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P, NA} \right)^2 - \left(\beta - \frac{q\lambda}{P, NA} \right)^2} \right]$$

式(44)

$$w_{focus}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = 1 - |g(\alpha, \beta, m, n, p, q)|$$

式(45)

$$w(\alpha, \beta, m, n, p, q) = w_{LS}(m, n, p, q) w_{focus}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

式(46)

【0082】上述の方法論によって、焦点の影響、収差に対して、強度の感度を最小限に抑えることができる。強度に対する焦点の影響が最小限に抑えられるので、特定の収差に対して強度の影響を最小限に抑えられる。これは、特定の収差に対して高い感度が実証されている何*

$$K(\alpha, \beta) = K_o(\alpha, \beta) K_s(\alpha, \beta)$$

式(47)

【0083】特定の収差 Z_i に対する強度の感度は、 Z_i に対する強度の導関数をゼロに設定することで、最小限に抑えることができる。式47を式1ないし3に代入

20※らかのパターンについて望ましい。式19における投影ひとみは、式47に示すように、逸脱項 $K_s(\alpha, \beta)$ によって乗算した非逸脱項 $K_o(\alpha, \beta)$ として書くことができる。

★し、強度の導関数を取ることで、式48における $h(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ がゼロに等しい場合、収差感度を最小限に抑える。

$$\frac{\partial}{\partial Z_i} I(x, y) = 0 \Rightarrow$$

$$h(\alpha, \beta, m, n, p, q) = K_o \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P, NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P, NA} \right) \frac{\partial}{\partial Z_i} K_s \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P, NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P, NA} \right) + \frac{\partial}{\partial Z_i} K_o \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P, NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P, NA} \right) K_s \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P, NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P, NA} \right) = 0$$

式(48)

$$h(\alpha, \beta, m, n, p, q) = \left[R_i \left(\alpha - \frac{p\lambda}{P, NA}, \beta - \frac{q\lambda}{P, NA} \right) - R_i \left(\alpha + \frac{m\lambda}{P, NA}, \beta + \frac{n\lambda}{P, NA} \right) \right] = 0$$

式(49)

【0084】式48は、式49のように簡略化して書くことも可能である。式50において重み付け関数 $w_{\alpha\beta}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$ を定義し、これは Z_i に

40☆対して感度が最低のひとみの領域（ α, β ）では1に等しく、 Z_i に対して感度が最高の領域では0に等しい。

$$w_{\alpha\beta}(\alpha, \beta, m, n, p, q) = 1 - \frac{1}{2} |h(\alpha, \beta, m, n, p, q)|$$

式(50)

【0085】次いで、式51において、特定の収差 Z_i に対するILS感度を最小限に抑える重み付け関数を定義することができる。更に、式52に、特定の収差 Z_i に対するILS感度を最小限に抑え、全焦点を通じてI

LSを最大化する重み付け関数も定義することができる。これらの式のいずれも式34に代入して、所与の測定基準に対する最適な応答を有する照明装置を算出することができる。

$$w(\alpha, \beta, m, n, p, q) = w_{NILS}(m, n, p, q) w_{ab}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

式(51)

$$w(\alpha, \beta, m, n, p, q) = w_{NILS}(m, n, p, q) w_{focus}(\alpha, \beta, m, n, p, q) w_{ab}(\alpha, \beta, m, n, p, q)$$

式(52)

【0086】図15は、本発明に従って用いられるリソグラフィ装置の1例の概略図である。この装置は、放射システムを含む。放射システムは、ランプLA（これは、例えばエキシマ・レーザとすれば良い）と、照明システムとから成る。照明システムは、例えば、ビーム整形光学系EX、積分器IN、および集光レンズCOを備えることができる。放射システムは、放射の投影ビームPBを供給する。例えば、放射システムは、紫外線、深紫外線、または超紫外線放射を供給することができる。また、一般に、放射システムは、軟X線または他の形態の放射を供給することも可能である。

【0087】第1の物体テーブルまたはマスク・テーブルMTが、マスクMAを保持する。マスクMAは、結像対象のマスク・パターンを含むパターン領域Cを含む。マスク・テーブルMTは、投影ビームPBに対して移動することができるので、マスクの異なる部分を照射することが可能である。マスクが基板またはウエハWと適切に位置合わせされているか否かを判定するために、位置合わせマスクM₁およびM₂を用いる。

【0088】投影システムPLが、投影ビームPBをウエハW上に投影する。ウエハWは、2枚の位置合わせマスクP₁およびP₂を含み、これらは、結像を開始する前にマスクM₁およびM₂と位置合わせされる。ウエハWは、基板テーブルWTによって支持され、このテーブルWTは、ウエハWの異なる部分を露光するために投影ビームに対して移動することができる。このようにして、マスク・パターンCを、ウエハWの異なる対象部分c上に結像することができる。ウエハ・テーブルWTがマスク・テーブルMTの位置に対して確実に正しい位置にあるようにするために、干渉位置モニタIFを用いる。

【0089】本発明について、特定の実施形態に関連付けて説明してきたが、本発明は開示した実施形態に限定されるわけではなく、逆に、特許請求の範囲内に含まれる様々な変形および均等の構成を包含するよう意図することは理解されよう。

【図面の簡単な説明】

【図1】一般化した画像形成システムのための相互透過係数関数の図である。

【図2】れんが壁分離パターンのマイクロリソグラフィによるマスク・フィーチャの1例である。

【図3】図2のマスク・フィーチャの回折オーダーの図である。

【図4】図2のマスク・フィーチャのための算出された最適化4次元照明形状のマップである。

【図5】図2のマスク・フィーチャのための算出された初期グレー・スケール照明形状(J_{tot})である。

【図6】図5の照明形状の2値表現である。

【図7】環状照明形状によって印刷した図2のマスク・フィーチャの印刷物の分析を示す。

【図8】最適化した楕円照明形状によって印刷した図2のマスク・フィーチャの印刷物の分析を示す。

【図9】110nm設計基準に縮小した図2のマスク・フィーチャのための算出された最適化4次元照明形状のマップである。

【図10】110nm設計基準に縮小した図2のマスク・フィーチャのための算出された初期グレー・スケール照明形状である。

【図11a】σの値が異なる図10の照明形状の2値表現である。

【図11b】σの値が異なる図10の照明形状の2値表現である。

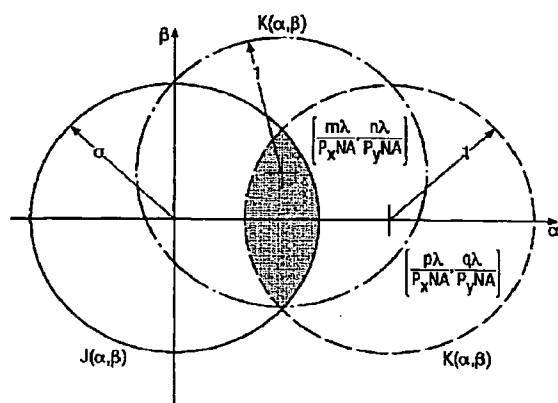
【図12】クリティカル・ゲートおよびセルを示したマスク・パターンの1例である。

【図13】パターンのピッチ数を減らすために補助フィーチャを加えた図12のマスク・パターンである。

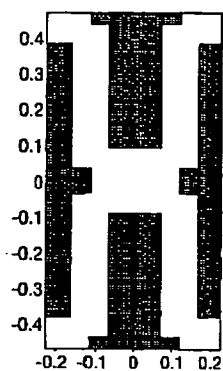
【図14】図12および13のマスク・パターンの空間幅の確率密度関数を比較する。

【図15】マイクロフォトリソグラフィのための装置の概略図である。

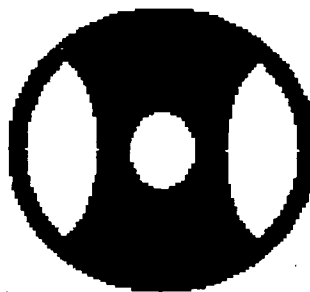
【図1】



【図2】

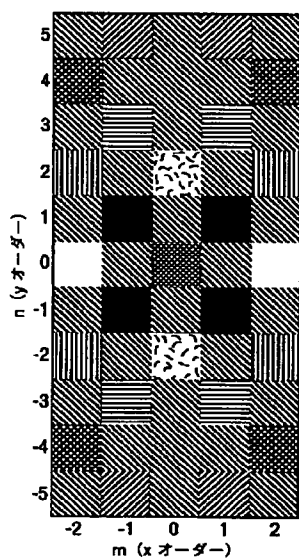


【図6】

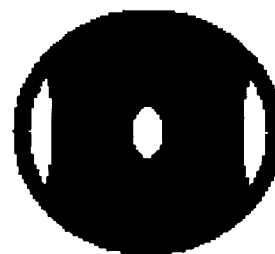
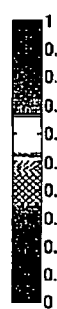
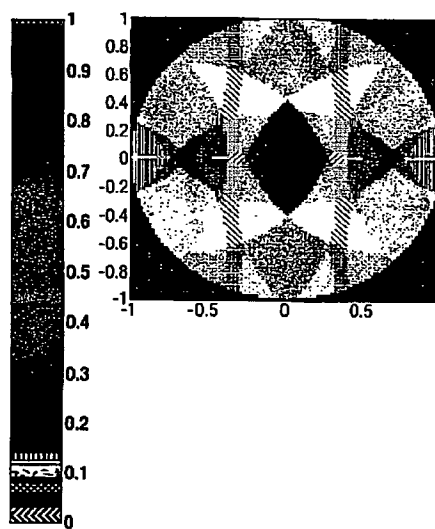


【図11a】

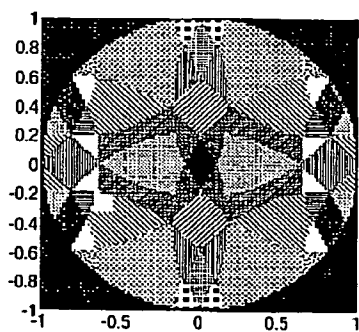
【図3】



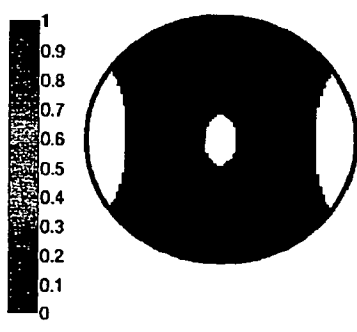
【図5】



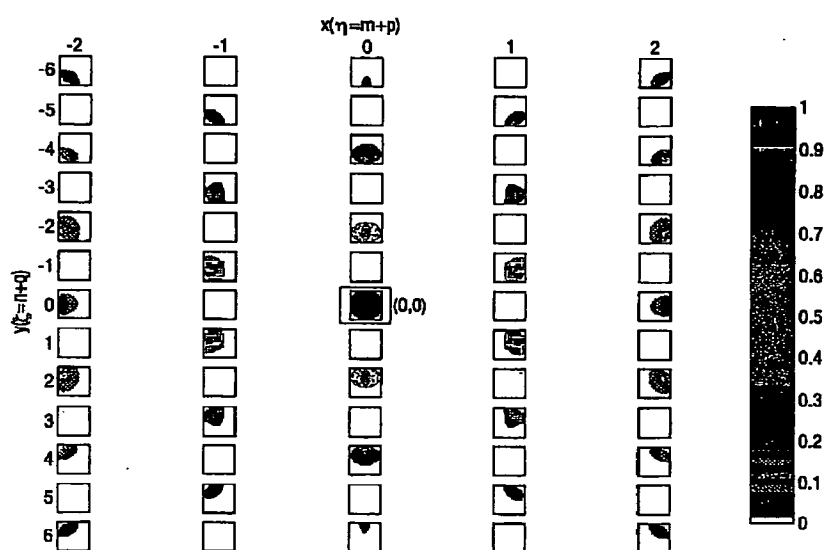
【図10】



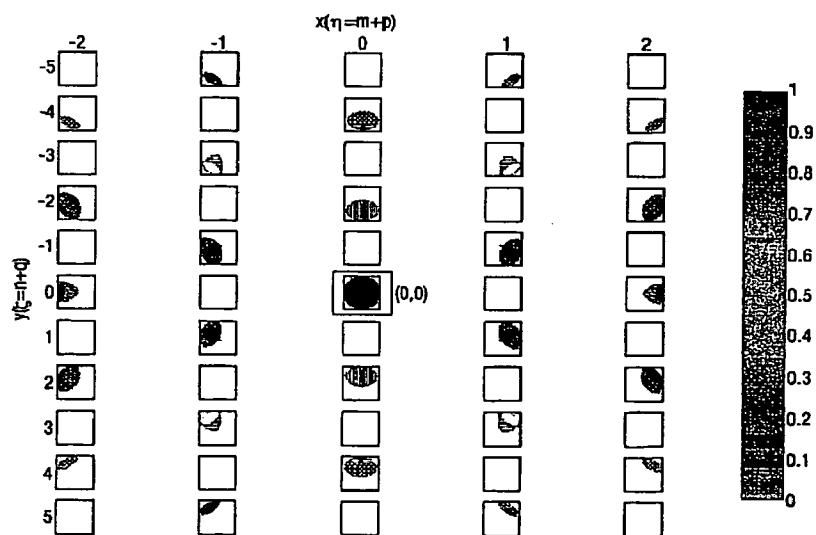
【図11b】



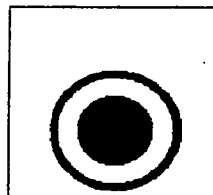
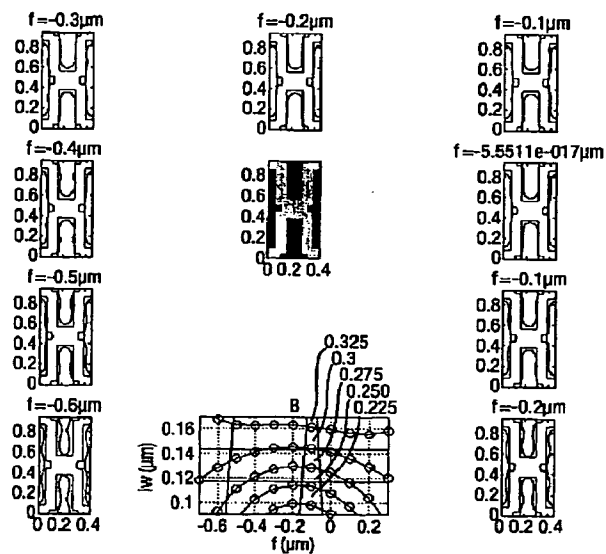
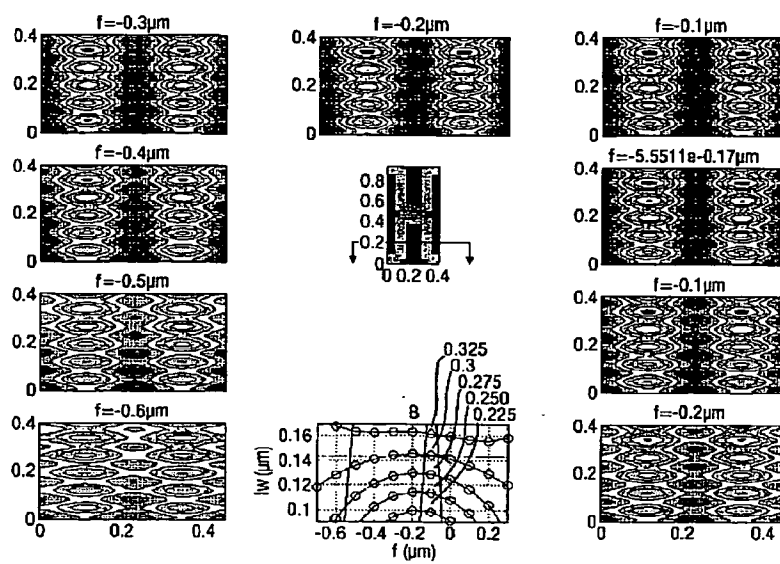
【図 4】



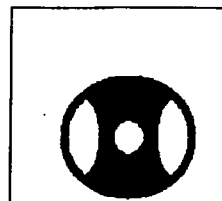
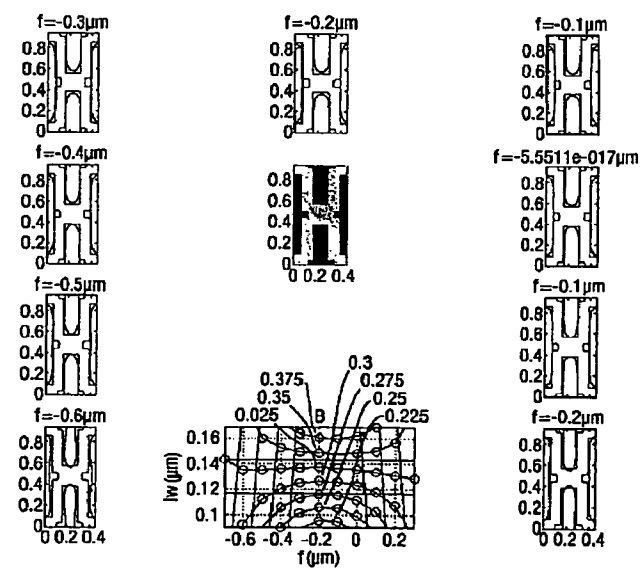
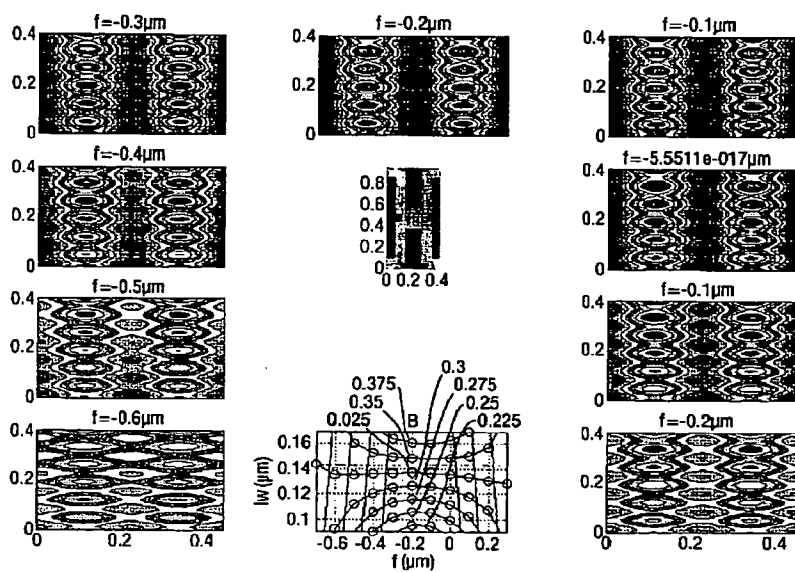
【図 9】



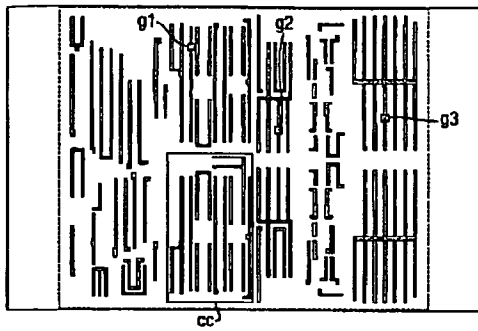
【図 7】



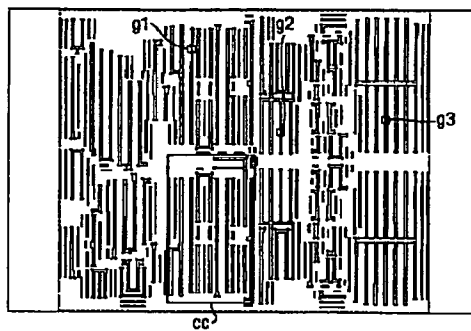
【図 8】



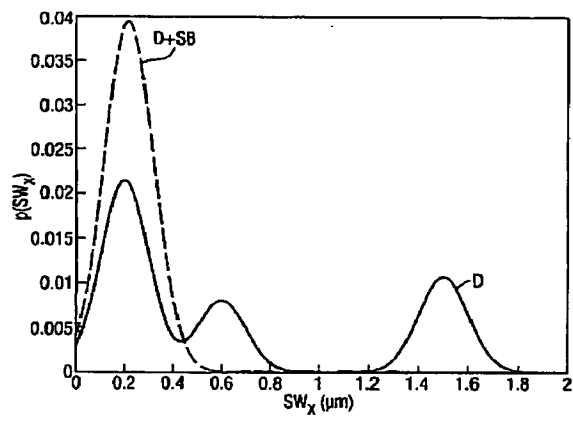
【図12】



【図13】



【図14】



【図15】

